
1837
ARTES
VERITAS
SCIENTIA
LIBRARY OF THE
UNIVERSITY OF MICHIGAN
TUEBOR
CIRCUMSPICE


UNIVERSITY·OF·MICHIGAN

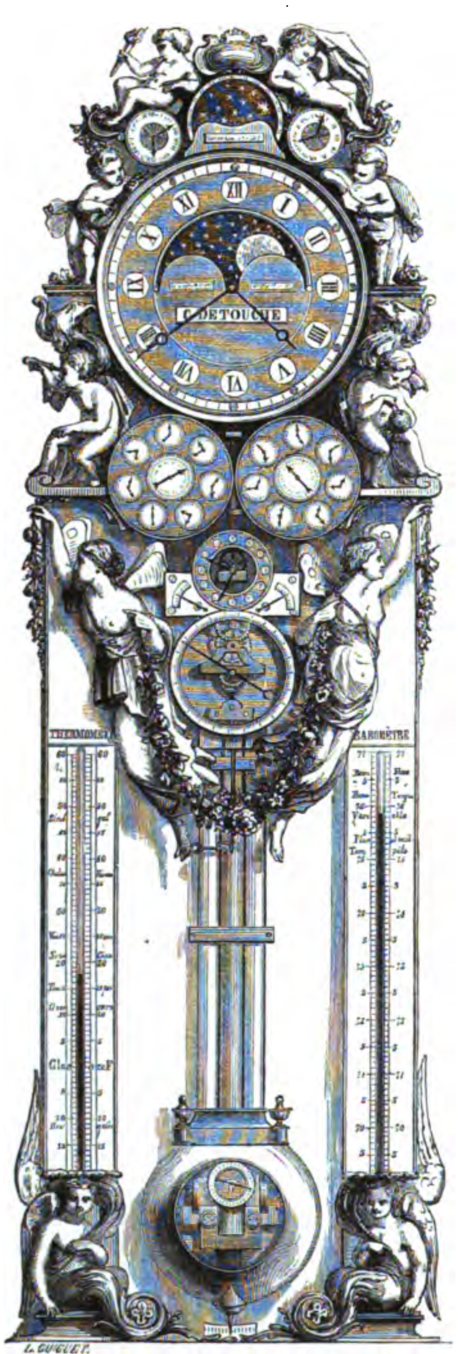
T
5
, M
1



NOUVEAU TRAITÉ GÉNÉRAL

D'HORLOGERI

PARIS. — IMPRIMERIE ARNOUS DE RIVIÈRE ET Ce, RUE ACINE, 26.


C. DETOUCHE
THERMOMÈT
BAROMÈTRE
L. GUIGUET.

NOUVEAU TRAITÉ GÉNÉRAL
D'HORLOGERIE

PAR

M. L. MOINET

Professeur des Arts et Collaborateur d'artistes renommés, ancien Président de la Société chronométrique de Paris, Membre honoraire de la Société mathématique de Hambourg, etc.

CONTENANT :

UNE NOUVELLE MÉTHODE PRATIQUE ET UNIVERSELLE DE L'ENGRENAGE, AVEC FIGURES EXACTES ET EN GRAND DES PIGNONS ET DENTURES, AISÉMENT RÉDUCTIBLES EN PETIT; LES ÉCHAPPEMENTS ANCIENS ET MODERNES ET LES ÉCHAPPEMENTS LIBRES ACTUELS, CADRATURES, MAIN-D'OEUVRE, TABLES, ETC., LE TOUT A L'USAGE DES ATELIERS; ENRICHI D'ÉLÉMENTS DE PHYSIQUE GÉNÉRALE, OU PREMIÈRES NOTIONS USUELLES DE GÉOMÉTRIE PRATIQUE, DE MÉCANIQUE, CHIMIE, GNOMONIQUE, POUR MÉRIDIENS, CADRANS SOLAIRES, BAROMÈTRES, THERMOMÈTRES, ETC.

ET DE NOMBREUSES PLANCHES.

TOME SECOND

TROISIÈME ÉDITION, AUGMENTÉE D'UN APPENDICE

CONTENANT

De Nouvelles études sur les échappements anciens et modernes, le pendule ordinaire, le pendule conique et le balancier annulaire avec la Théorie du spiral réglant de *M. PHILLIPS;*

Les applications de l'électricité à l'horlogerie et la description d'une série d'appareils spéciaux se rattachant à l'art de l'horloger.

PAR M. A. DEBIZE,

INGÉNIEUR DES MANUFACTURES DE L'ÉTAT.

Nouveau tirage suivi de

LES MONTRES MARINES

DESCRIPTION, THÉORIE ET PERTURBATIONS

PAR MM.

A. LEDIEU & M. A. H. RODANET

Correspondant et lauréat de l'Institut — Constructeur de Chronomètres

PARIS

DUNOD, ÉDITEUR

LIBRAIRE DES CORPS DES PONTS ET CHAUSSÉES ET DES MINES

Quai des Augustins, 49

1877

TRAITÉ

ÉLÉMENTAIRE, THÉORIQUE ET PRATIQUE

D'HORLOGERIE,

POUR L'USAGE CIVIL ET ASTRONOMIQUE.

DEUXIÈME PARTIE.

CHAPITRE PREMIER.

703 *bis*. Les constructions ordinaires des pièces d'Horlogerie à l'usage civil ayant été expliquées dans la première partie de cet ouvrage, nous ne traiterons dans cette seconde partie, comme nous l'avons annoncé, que des compositions qui comportent des améliorations notables, soit dans les Pendules et les Montres soignées, et au-dessus de celles du commerce, soit dans les instruments d'observation et de précision employés par les sciences. Cette matière plus abstraite sera aussi entremêlée de quelques articles de physique générale qui nous restent à exposer; leur ensemble, réuni en un seul corps, nous ayant paru former une trop longue interruption au milieu du sujet principal, nous continuerons à distribuer ces articles de théorie sur les points avec lesquels ils auront un rapport plus direct.

704. Des détails d'instruction accessoire aux travaux ordinaires peuvent paraître moins utiles pour les produits courants de fabrique où, en copiant des modèles du commerce, il suffit d'une imitation exacte et proprement exécutée, jointe à la rapidité de la main-d'œuvre; mais en est-il de même pour les chefs d'ateliers, les visiteurs, les repasseurs, les faiseurs d'échappements et les cadraturiers, surtout avec la variation actuelle des calibres? Nous ne le pensons pas; car il importe aux fabriques de trouver des hommes instruits dans les chefs des travaux et chez les autres ouvriers spéciaux auxquels ils ont recours, afin que les produits satisfassent convenablement aux *commandes* particulières d'ouvrages soignés, qui font la réputation des établissements. On a vu des ouvrages de fabrique rivaliser de soins et de solidité avec les productions distinguées des habiles maîtres de l'art, et être livrés néanmoins à des prix fort inférieurs que permet la division du travail; mais il faut convenir aussi que ces soins et cette réduction de prix sont des sacrifices réfléchis et momentanés des fabriques, qui ne se soutiendraient pas sans le

grand débit de leurs travaux ordinaires (les détails de ceux-ci seront complétés dans nos articles *Rhabillage*, *Repassage*, etc.).

705. Les connaissances générales et en apparence accessoires sont donc plus utiles qu'elles ne le paraissent, même dans les travaux communs, puisque c'est par ce moyen que ceux-ci se simplifient et deviennent plus corrects, et que la connaissance des principes doit aussi diriger la construction et la vérification des outils d'un usage plus sûr et plus prompt que le seul travail de la main.

706. On nous dispensera d'appuyer sur l'utilité plus évidente encore de ces connaissances, pour la perfection indéfiniment croissante et de plus en plus exigée des compositions qui se rapportent à la marine, à l'astronomie et à la physique, en un mot, à l'étude des sciences. A cet égard, l'instruction ne se trouve que trop gênée, malheureusement, par la nécessité de veiller à l'existence d'établissements particuliers, qui ne permettent pas de se livrer aux expériences et à l'analyse; des artistes très-habiles n'ont souvent ni le temps ni les facultés de poursuivre les recherches propres à résoudre, ou du moins à éclairer bien des difficultés de théorie qui restent à surmonter.

707. Nous l'avons déjà dit à la fin de notre première partie, et nous ne saurions trop le répéter, l'*instruction* doit accompagner la *main-d'œuvre*. S'il arrive parfois que les moyens pratiques ne répondent pas à la subtilité des conceptions abstraites et nouvelles, pour lesquelles on n'a pas prévu les bornes de l'exécution, faute de les avoir encore éprouvées dans la pratique, bien plus souvent encore l'exécution la plus séduisante et la plus habile n'a pu masquer le défaut de savoir. Tous les artistes instruits et expérimentés s'accordent à juger que c'est par les principes des lois mécaniques judicieusement appliquées qu'une composition doit se soutenir, et non par les soins recherchés de la main-d'œuvre, et qu'une idée juste doit réussir, même avec une exécution médiocre. Les soins, le grand fini employés à propos, sont loin de nuire sans doute, et peuvent au contraire faciliter les effets, mais ils ne donnent ni la sûreté ni la constance, et l'on a vu fréquemment le luxe de main-d'œuvre et la disposition flatteuse des compositions ne pouvoir suppléer à l'absence de justesse dans la pensée. C'est ce qui faisait dire à *F. Berthoud*, lorsque l'exécution commençait à se perfectionner et à se *prévaloir :* « Nous ne manquons pas de mains, mais de têtes. »

708. Le véritable artiste ne peut rester en arrière de son siècle, surtout depuis les progrès encore récents des sciences et des arts, et l'expansion des premières notions de ce genre dans la société. Tel, qui précédemment aurait passé pour capable, n'offrirait aujourd'hui qu'une singulière ignorance. Il faut donc *s'instruire* pour arriver au moins au niveau de son temps. Sous peu d'années, nous l'avons dit aux élèves, une trop grande concurrence et la communication incessante des notions générales rendront le public plus difficile ; il ne s'adressera plus qu'aux artistes reconnus pour avoir étudié profondément et avec fruit; les autres, relégués dans les travaux les plus vulgaires, ou sans occupation, s'apercevront trop tard de leur négligence.

709. Si les bornes de cet ouvrage ne nous permettent pas d'y réunir toute l'instruction et l'expérience des hommes de mérite qui ont parcouru la carrière et en ont

successivement préparé les progrès, nous en exposerons du moins les points les plus essentiels et les plus propres à indiquer les moyens d'avancer davantage. Ces premières études aplaniront beaucoup la plupart des difficultés de l'art. On sait combien l'analyse, aidée du calcul, facilite une foule de solutions; le zèle et le goût de ceux qui auront le bon esprit d'en entreprendre la culture leur feront bientôt sentir l'utilité de se fortifier en ce sens. L'étude suivie régulièrement de la *géométrie* et de l'*algèbre* en seront les principaux moyens. Au lieu de tâtonnements longs, ruineux, et qui ne conduisent souvent qu'à l'indécision, il est plus avantageux de résoudre d'abord les propositions par la voie mathématique, qui donne seule des quantités précises en principe, sauf à la pratique exercée à en déduire ce qui est absorbé par l'application. Quoique nous tâchions d'introduire dans cet ouvrage les procédés pratiques qui peuvent le mieux remplacer une instruction plus avancée, nous devons toujours recommander les avantages de la méthode analytique. « L'*algèbre* littérale (c'est-à-dire qui emploie les lettres de l'alphabet en place de chiffres) est une sorte d'arithmétique qui sert à calculer des quantités indéterminées, et qui traite les quantités *cherchées* comme si elles étaient connues : *Newton* l'appelle *arithmétique universelle*. Les deux mots *algèbre* et *analyse* sont souvent employés comme synonymes. C'est à l'analyse que sont dues les plus belles découvertes des derniers siècles dans les mathématiques, ainsi que le grand avantage des mathématiciens modernes sur les anciens. Une longue suite d'arguments qui rempliraient des volumes entiers, et où l'attention ne pourrait retenir la liaison des idées, est convertie par l'algèbre et l'analyse en des signes sensibles et abréviatifs, qui resserrent souvent un grand nombre de vérités dans quelques lignes. » Mais cette méthode, si utile, exige une étude spéciale et raisonnée, pour ne pas en user comme les calculateurs vulgaires, qui emploient les règles communes de l'arithmétique par routine, sans les comprendre et sans pouvoir s'en expliquer la marche, ce qui arrive aussi à ceux qui ont mal étudié l'algèbre (*d'Alemb.*).

710. Nous recommanderons donc toujours ces études abstraites ; mais, comme il n'est pas donné à tous de pouvoir s'y livrer, nous tâcherons d'y suppléer, comme nous l'avons dit ailleurs, par des procédés pratiques fondés sur les principes rigoureux. Ces procédés n'exigeront, chez les lecteurs les moins avancés, que l'habitude au moins supposée des premières règles du calcul numérique. C'est dans ce but que nous avons annoncé pour la fin de cet ouvrage des exemples en ce genre, propres à remettre sur la voie ceux qui en auraient négligé l'usage, tant par la méthode ancienne que par celle dite *décimale*, connue depuis longtemps, mais souvent préférée aujourd'hui comme plus facile et plus expéditive.

711. Nos définitions et nos explications dans ces matières seront rarement exprimées par les termes propres de la science, qu'il nous serait bien plus facile de transcrire; mais nous croyons devoir y employer un langage moins sévère, pour la facilité de quelques lecteurs. Nous nous attacherons néanmoins à l'esprit des principes, traduits uniquement par des termes plus usuels : l'essentiel ici est d'être compris et de ne pas s'écarter du vrai, comme on l'a déjà dit antérieurement.

712. Nous joindrons particulièrement aux méthodes numériques celle des *logarithmes*, très-facile au fond, abrégeant prodigieusement de longs calculs, et prévenant même l'erreur dans les cas les plus simples. Les *Tables de logarithmes* sont, pour ainsi dire, le *Barême* ou *livre de comptes faits* des arithméticiens. « Combien n'ai-je pas perdu « de temps, s'écriait *Antide Janvier*, avec les calculs purement arithmétiques! Quel « instrument précieux que les *logarithmes mis par Neper* entre les mains des calcula« teurs! Ah! si *Kepler* avait eu cette ressource, aurait-il passé cinq ans à établir la théo« rie de Mars? Un seul exemple de ses nombreux cahiers, *couverts de chiffres*, rempli« rait-il dix pages in-folio? » Tandis que l'auteur que nous citons étalait ainsi l'avantage qu'il retirait de cette méthode dans le calcul de ses rouages représentant les mouvements célestes, on doit regretter qu'il n'ait pas consacré quelques pages à en aplanir la route pour les artistes contemporains. Mais, quand on n'a qu'un moyen de supériorité, on le communique d'autant moins que l'on se sent inférieur sur d'autres points, et nous sommes forcés d'avouer que cet artiste habile, instruit et doué d'une rare intelligence, tout en s'occupant avec beaucoup de succès (mais non pour sa fortune) de calculs et de rouages astronomiques, a très-peu amélioré les progrès de ce qu'on appelle la mesure exacte du temps, but principal de l'art, et vers lequel des facultés aussi précieuses pouvaient faire augurer d'importants progrès. Nous nous empresserons de suppléer au silence volontaire de cet auteur, à l'égard de cette méthode de calcul, que son nom scientifique fait trop appréhender dans les ateliers, et nous y conduirons aisément le lecteur par des exemples simples et faciles à imiter.

713. Nous allons traiter aussi bientôt de cette partie de physique générale la plus directement utile à l'artiste, de celle qui expose les lois de la mécanique, réduites en définitive à celles du *levier* et du *plan incliné*, suivies des lois du mouvement et du choc des corps, de l'appréciation des *forces*, de leur *composition* et *décomposition*, des observations modernes sur les *frottements*, etc. Nous espérons rendre ces articles assez précis et clairs pour que le surplus soit facile à déduire de ce qu'on aura déjà compris, et que les lectêurs puissent en poursuivre l'étude plus ou moins étendue dans les auteurs spéciaux. Nous ne pouvons pas traduire ici leurs traités; mais il suffira d'être averti par quelques exemples de l'importance de ces études pour l'intelligence complète de certaines compositions, et surtout pour en produire de nouvelles plus parfaites; car c'est presque reculer que d'innover sans un avantage réel et clairement démontré d'avance. Parmi d'autres articles plus secondaires, on trouvera plus loin ceux de métallurgie, et ceux de minéralogie quant au choix et au *travail développé des pierres fines*, et seulement en ce qui concerne notre objet principal. Les notions astronomiques, bornées aux principaux phénomènes de notre système planétaire, seront réservées pour les articles *Temps sidéral*, *Réglage* par le *soleil* et les *étoiles*, rouages représentant les *mouvements célestes*, etc. C'est ainsi que ces connaissances utiles, annoncées de suite dans le tableau final du prospectus, seront plus avantageusement distribuées dans les chapitres auxquels elles se rapportent, parmi les articles de ce même tableau et d'autres qui n'ont pu y trouver place (ce qui est assez indiqué par les etc., etc., de la dernière

ligne). Une table des chapitres et de leur contenu renverra facilement à chacun de ces articles.

714. Après avoir ébauché, pour ainsi dire, ce programme abrégé et servant d'introduction à notre seconde partie, dont l'importance sera encore mieux sentie à la lecture, même à l'égard des ouvrages purement civils, nous allons entrer en matière par les deux premiers perfectionnements de l'Horlogerie.

715. Le plus ancien, celui du *remontoir d'égalité*, fut indiqué, comme on l'a dit au commencement de la première partie, par *Huyghens* et *Leibnitz*, deux des premiers génies de leur siècle; mais il fut abandonné peu après; il a été repris souvent, et se trouve appliqué de nos jours dans plusieurs compositions modernes, avec des succès divers; il se fait souvent remarquer aujourd'hui dans nos expositions et ailleurs. C'était, dans l'origine, une modification de la force motrice, au moyen d'une légère force secondaire appliquée plus ou moins directement à l'échappement, et remontée très-fréquemment par le rouage ordinaire, qui, n'ayant plus que cette dernière fonction, cessait d'avoir un rapport direct avec l'échappement. Par ce procédé, les inégalités du rouage et de ses frottements, nulles pour le remontoir, ne devraient plus affecter le régulateur. On cite dans divers ouvrages les *remontoirs* déjà anciens de *Gaudron*, de *Thiout* et autres; mais ces constructions n'avaient pour but, tout en remplaçant l'action inégale du ressort moteur par celle plus constante d'un poids, que de réduire la descente de ce poids dans les pièces d'appartement à boîtes courtes : aussi leur mécanisme était-il appliqué à la roue du centre ou des minutes, et laissait-il l'échappement sous l'influence variable de trois engrenages et des frottements de deux mobiles au-dessous de la roue d'échappement, comme le remarque justement *F. Berthoud;* or, ce n'était pas là le but des premiers inventeurs; on l'a mieux conçu de nos jours, en établissant les effets de remontoir jusque dans l'échappement même; mais peut-être aussi a-t-on dépassé ce but, en chargeant de plusieurs effets l'échappement qui, par sa nature, paraît exiger généralement la plus grande simplicité. Des idées fort ingénieuses et très-variées ont été présentées en grand nombre dans ces derniers temps, et précipitamment adoptées comme de notables perfectionnements. En traitant ce sujet important, nous exposerons également les doutes qu'il fait naître; et c'est par là que nous débuterons dans ce premier chapitre.

716. L'autre perfectionnement de l'Horlogerie, d'une date un peu postérieure, est dû aux artistes anglais; c'est l'*équation du temps*, fort employée d'abord dans les ouvrages d'une composition recherchée, et qui mérite encore de l'être. Il est vrai que l'usage du temps moyen ou égal et uniforme, adopté depuis longtemps dans plusieurs capitales de l'Europe, et depuis quelques années à Paris, rend presque inutile l'usage public du temps solaire, inégal par sa nature. Mais ce dernier est toujours suivi dans les campagnes, qui n'ont le plus ordinairement d'autre règle que des cadrans solaires. Ceux-ci diffèrent à plusieurs reprises du temps moyen uniforme, sur lequel ils avancent de seize minutes un quart au 1er novembre, et retardent de quatorze minutes et demie vers le milieu de février. Or, cette différence d'une demi-heure entre ces deux

époques de l'année, et diverse à des époques intermédiaires, peut intéresser dans les rapports de la ville avec la campagne. L'*Annuaire du Bureau des longitudes* (de l'Observatoire) contient une table annuelle d'équation, où l'on trouve pour chaque jour les corrections du temps solaire, sous le titre de *temps moyen au midi vrai*. Le midi vrai ou solaire est seul inégal; mais, comme ses inégalités sont calculées, il sert à retrouver chaque jour le temps moyen avec lequel, du reste, il se rencontre presque juste à quatre époques de l'année, qui sont les 15 avril, 16 juin, 31 août et 25 décembre. Pour tous les autres jours, on trouve dans la table ce qu'il faut ajouter ou retrancher au temps solaire, pour avoir le temps moyen ou égal, à l'instant du retour du méridien terrestre sur le centre du soleil, retour connu par un gnomon ou une bonne méridienne; mais, comme il faut à cette observation un petit calcul, il est toujours plus commode de le trouver tout fait, en jetant les yeux sur le cadran d'une Pendule à *équation*.

717. Il résulte d'une telle disposition dans la Pendule un autre genre d'utilité : c'est qu'en y employant une roue annuelle nécessaire pour l'équation, on peut avoir à peu de frais en plus un quantième annuel, c'est-à-dire qui donne les différentes longueurs des mois de 28, 30 et 31 jours, ce que les petits quantièmes mensuels ne peuvent marquer, car on est obligé de faire sauter l'aiguille de ceux-ci plusieurs fois dans l'année et à des époques que l'on oublie trop facilement. Or, puisqu'il faut pour le quantième annuel une roue d'une révolution par an, qui exige une disposition particulière, ce n'est guère le cas de se priver de la courbe annuelle d'équation, à laquelle on ajoute les parties accessoires pour faire marcher une aiguille, ou plus simplement un cadran mobile qui marque cette équation; comme, si la Pendule est à équation, il faut encore moins de travail pour y joindre le quantième annuel; aussi ces deux fonctions sont-elles ordinairement réunies. Ce sont ces avantages qui ont maintenu jusqu'ici l'emploi de ces cadratures, appliquées encore de nos jours aux Pendules soignées et à plusieurs grands *régulateurs* à secondes. On n'a à retoucher à un quantième annuel que pour le 29 février, dans l'année bissextile; mais on a étendu le mécanisme de l'équation jusqu'à la rendre quadriennale ou bissextile, de sorte que le 29 février s'y marque de lui-même; alors le quantième est perpétuel, et l'on n'a jamais besoin d'y toucher, si l'on n'a pas laissé arrêter la pièce.

718. Le mécanisme de la plupart des équations offre encore à l'artiste un autre intérêt : c'est l'emploi d'un artifice qu'il lui importe d'étudier, parce que l'application peut en être faite utilement dans diverses circonstances. Tel est le système de rouage renouvelé de nos jours sous le nom de *roues satellites*, idée fort ingénieuse, anciennement pratiquée, mais que l'artiste habile qui l'a reproduite dans ces derniers temps paraît avoir été bien capable d'imaginer lui-même, et dans laquelle, comme il arrive souvent, il a pu se rencontrer avec les anciens artistes de Nuremberg, en Allemagne, qui étaient en possession de cet artifice adroit depuis plus de trois siècles, suivant *Antide Janvier :* « On n'en « connaît pas l'ancien auteur, dit-il; je dessinai, en 1768, durant mon séjour à Besan- « çon, une ancienne machine de ce genre, placée dans la chapelle de l'hôtel de ville, et

« qui lui fut donnée par le cardinal de *Granvelle*. Toutes les roues de la cadrature sont « en acier très-doux, comme celles des autres Pendules de cette espèce que j'ai eues « à ma disposition depuis cette époque, et également fabriquées à Nuremberg. C'est « partout le même système de rouage, avec des mobiles transportés sur une circonfé- « rence (dentée et animée elle-même d'une vitesse connue) ; cette méthode, comme l'ont « observé plusieurs savants distingués, ne simplifie pas le rouage, mais elle fournit « un artifice de calcul certain pour arriver à la rigoureuse détermination d'une vi- « tesse, quelle que soit la fraction qui l'exprime ; je la connais depuis quarante ans. » L'auteur aurait pu ajouter que cette méthode se retrouve depuis longtemps dans la minuterie de plusieurs équations comme moyen de faire avancer ou reculer l'aiguille du soleil, suivant les variations du midi solaire, pendant la marche des aiguilles du temps moyen. Il est assez naturel aussi qu'il l'ait employé lui-même comme il le dit, puisque, entre les productions de Nuremberg, on trouve ce même artifice dans plusieurs machines planétaires antérieures à celles d'*Ant. Janvier*. Nous proposerons aussi ailleurs ce moyen comme propre à remplacer plus commodément certains calculs des fractions par les *logarithmes*, ainsi que pour les révolutions fractionnaires de quelques mobiles, autour d'autres déjà en mouvement.

REMONTOIR D'ÉGALITÉ, PAR R. ROBIN.

719. Une des époques où l'application d'un remontoir d'une disposition simple paraît reprise avec succès, est celle où feu *R. Robin*, habile Horloger de Paris, l'établit de la manière que nous allons décrire d'abord, comme une des moins compliquées et la plus facile à concevoir. Elle offre une traduction de la première idée d'*Huyghens*, sauf le moyen de dégagement de cet ancien auteur, dégagement très-important à déterminer ; celui d'*Huyghens* n'ayant pas été transmis, ceux qui ont adopté depuis l'emploi du remontoir ont dû imaginer entièrement la méthode de le dégager.

720. Le calibre de pendule, placé à gauche de la planche XIX *bis*, présente l'arrière de la seconde platine, en dehors de laquelle les parties principales du remontoir sont placées entre la platine et le pendule supposé ici en avant et vers le spectateur. Ce pendule est enlevé pour le moment, et il n'en reste en haut que le support *gg* de la gouttière en A pour le couteau de suspension, méthode plus généralement adoptée à cette époque pour les fortes lentilles (on préfère à présent la suspension à 2 ressorts).

721. Les mobiles du rouage intérieur entre les deux platines sont simplement pointillés. On n'en a mis au trait que les deux parties excédantes de chaque côté des deux barillets BB, qui engrènent tous deux avec le pignon inférieur C, en produisant ainsi une force puissante, telle que l'exigent les remontoirs. Les dents de ces barillets ont ici une forme carrée, par abréviation de gravure ; mais on sait qu'elles doivent se terminer en ogive. Ces barillets mènent le rouage pour quarante-cinq jours de marche ; le pendule à demi-secondes, avec compensation à châssis et à neuf branches, acier et laiton, porte une lentille pleine en laiton et pesant trois livres. Le barillet de droite tourne de C en BD, et

celui de gauche de B en FC, et fait tourner le pignon C et sa roue DD à gauche, pour le spectateur considérant ce calibre par sa *face postérieure*, ce qu'il ne faut pas oublier dans tout ce que nous dirons de ce mécanisme. On voit déjà que les deux barillets marchent ici à droite, et, comme leurs carrés de remontage sont du côté du cadran, il faut y tourner la clef à gauche pour remonter les deux grands ressorts moteurs. Le premier pignon C marchant donc à gauche, ainsi que sa roue DD, tournant en DTE, le pignon E et sa roue F tournent à droite ; le pignon G et sa roue H tournent à gauche, et le pignon I et son volant KK tournent à droite, vus dans cette face postérieure. Les nombres sont en rapport avec les dimensions des mobiles.

Le volant K est placé en dehors, à une ligne de distance de la deuxième platine, et ici en avant d'elle pour le spectateur. Ce volant est gravé au trait, ainsi que les autres mobiles qui sont comme lui en dehors, pour les distinguer de ceux en cage et pointillés. La minuterie, qui est de l'autre côté, celui du cadran, n'a pas été pointillée pour ne pas embrouiller la figure.

722. Un pivot du volant roule dans le pont I *h* du côté du spectateur, et sa tige pénètre librement par une assez grande ouverture de la platine pour porter dans la cage son pignon mené par la roue H ; l'autre pivot du volant roule dans la première platine du cadran qui se trouve ici en arrière, comme on l'a déjà dit.

On conçoit déjà, par ce qui précède, que l'action simultanée des deux barillets, transmise par la suite des roues DD, F, H, se borne seulement à faire tourner le volant K, dont chaque révolution peut être arrêtée par le bras IL, qu'il porte en avant ici et vers le bout de son axe, où ce bras est maintenu à frottement doux par une clavette à ressort. Le bras est arrêté en ce moment contre la chevile *i* d'une petite détente horizontale, ayant son centre de mouvement au bord de la deuxième platine. Ainsi le rouage décrit n'a point de rapport direct avec une roue U, qui est pointillée dans le haut de la cage et qui engrène seule avec le pignon V de la roue d'échappement X, dont on n'a indiqué que trois dents. La pièce d'échappement YAZ, également pointillée, parce qu'elle est aussi dans l'intérieur de la cage, indique assez que cet échappement est celui à ancre et à repos de *Graham*.

Il reste maintenant à expliquer la disposition de la force motrice secondaire, qui, agissant seule sur la roue U, et, par elle, sur la roue d'échappement X, entretient l'action de celle-ci sur l'ancre, et par sa fourchette sur le pendule ; la fourchette est ici également enlevée pour dégager la figure.

723. L'axe de la roue intérieure U traverse librement la deuxième platine, celle que nous voyons ici par l'arrière, pour porter l'un de ses pivots en S dans un pont extérieur et vertical SV ; le même axe porte extérieurement, près de son pivot S, une petite poulie S, située extérieurement entre le pont et la platine. La gorge pointillée de cette poulie est garnie de pointes, pour prévenir le glissement d'un petit cordon *sans fin* très-flexible, un peu moins gros que dans la gravure ; ce cordon embrasse le demi-tour supérieur de la poulie, et, d'un côté, à droite, il descend parallèlement à la platine et sans y toucher, jusqu'à la petite poulie libre et sans pointes du poids cylindrique P, d'où il remonte pour

s'enrouler vers DR, sur une grande poulie à pointes RT, laquelle est momentanément contenue *immobile*, comme nous l'expliquerons ci-après; ensuite le même bout du cordon descend à gauche en ED de la grande poulie, jusqu'à la petite poulie libre et sans pointe en *p* d'un contre-poids, et il en remonte le long de la platine jusqu'à la première petite poulie à pointes S, où il se réunit à sa première partie, comme toutes les cordes dites *sans fin*. La figure de la poulie du petit contre-poids *p* étant interrompue par le bord de la planche, l'autre moitié est figurée à côté de la platine en *pp'*; ce contre-poids, d'une forme ellipsoïde, ne pèse qu'environ le tiers du poids cylindrique P, qui est d'une once, et n'agit, par l'effet de sa petite poulie, que d'environ 4 gros sur la petite poulie à pointes S.

724. On voit donc que l'excès de pesanteur du poids P sur le contre-poids *pp'* sert à faire tourner la poulie S du haut, ainsi que sa roue U, sollicitant l'action de la roue d'échappement, qui marche ici de X en S, c'est-à-dire à gauche, parce que nous voyons la cage par l'arrière, et que le cadran est sur l'autre face opposée.

725. Nous avons dit que la roue F fait tourner le pignon G, etc.; mais, pour éviter la confusion, nous n'avons pas fait remarquer que cette même roue F engrène aussi dans un pignon T, porté dans l'intérieur de la cage par l'axe de la grande poulie à pointes RT, que nous avons supposée ci-dessus *immobile*. Or, chaque fois que le volant est libre de faire une révolution par l'effet de la force motrice armée des deux barillets, ce qui arrive quand son bras L est dégagé de la cheville *i*, autant de fois, la roue F, en faisant tourner le volant d'un tour, remonte aussi d'un certain arc de cercle le pignon et la grande poulie RT, qui tournent à gauche et remontent le poids cylindrique P d'autant qu'il est descendu par la progression de la roue d'échappement. D'après le calcul de la descente de ce poids et les rapports des autres mobiles, le dégagement du volant et le remontage partiel de la grande poulie à pointes doivent s'effectuer une fois pour chaque minute; il nous reste actuellement à décrire ce qui détermine l'instant de cet effet périodique.

726. On aperçoit au bas de la platine une longue bascule presque horizontale, légèrement contournée, ayant son centre de mouvement angulaire libre, sur une vis à portée (ou sur pivots), placée vers l'angle inférieur de gauche de cette même platine; l'autre extrémité de la bascule repose librement, par sa propre pesanteur, dans la boucle carrée et oblongue en hauteur du poids cylindrique P; la boucle adhérente au poids se présentant ici de profil, on ne peut voir l'ouverture oblongue que traverse librement le bout de la bascule, mais il est aisé de se l'imaginer. Cette même bascule porte à un pouce environ du centre de son mouvement un montant vertical, qui seul soutient dans sa position horizontale la détente *i*, dont la cheville arrête le bras du volant. Les extrémités du montant vertical, soit en *i* sur la détente, soit plus bas sur la bascule, sont maintenues librement par deux vis à portée. On conçoit donc qu'à mesure que le poids cylindrique P descend par la progression de la roue U et de l'échappement, le bout P de la bascule descend aussi par sa propre pesanteur, et avec elle la détente horizontale en *i* qui s'abaisse jusqu'au point d'abandonner le bras du volant; celui-ci, commandé par l'action des barillets, commence sa révolution, qui ne peut s'effectuer sans la pro-

gression de la roue F. Or, celle-ci faisant en même temps tourner le pignon T de la grande poulie à pointes, remonte nécessairement le poids cylindrique P, et avec lui la bascule, et par conséquent la détente *i*, en sorte que le bras du volant n'a que le temps de faire une révolution, et qu'en l'achevant il rencontre de nouveau la cheville *i*, qui l'arrête après un seul tour.

727. La grande poulie RT, supportée par le pont vertical TC, est dans un plan plus éloigné de la seconde platine, et plus en avant pour le spectateur que le plan de la petite poulie S; il en résulte que les deux côtés du cordon qui descendent verticalement de la petite poulie S sont plus près de la platine que les deux côtés qui remontent à la grande poulie RT, et que les poulies libres des poids sont obliques au plan de la platine, ce qui permet à la bascule de passer fort librement et sans toucher entre les deux branches du cordon qui soutiennent le contre-poids *pp'*. La petite poulie du gros poids cylindrique est tournée de même, mais son crochet peut rouler dans la chape, et il est facile de tourner l'anneau oblong qui soutient le bout de la bascule, de manière qu'elle ne frotte pas contre les parois intérieures, le bas étant un peu concave pour faire glisser naturellement la détente au milieu du vide, et lui laisser ainsi une entière liberté.

728. Pour faire marcher les roues de minuterie et entretenir leurs rapports de vitesse avec celle des secondes, dont l'axe est celui de la roue d'échappement et arrive au centre du cadran, la tige prolongée de la roue U traverse librement la première platine, pour porter son pivot dans un pont sous le cadran, où elle a, près de ce pivot, son pignon S menant toute la minuterie. Nous n'en donnons pas la description ni les figures, nos articles précédents de la première partie ont dû mettre à même de les imaginer aisément. N'ayant ici pour but que de décrire, pour la première fois dans cet ouvrage, le mécanisme d'un remontoir simple, comme introduction à la connaissance du genre, nous n'avons pas cru devoir le compliquer des détails d'une cadrature qui est ici assez chargée; car elle porte une équation et un quantième annuel, menés à la vérité par les barillets, ce qui vaut mieux généralement; et d'ailleurs nous reviendrons plus loin sur la construction d'une équation qu'il sera plus avantageux et plus clair d'expliquer à part.

729. Tout en estimant comme elle le mérite la construction simple et directe de l'auteur cité, nous croyons convenable de faire observer qu'il ne paraît pas avantageux ici que la minuterie soit conduite par la roue U, qui ne devrait mener que la roue d'échappement, afin d'éviter toutes les résistances du reste de la machine, résistances variables qui peuvent influer sur la durée constante des oscillations. On conçoit que l'auteur, qui a fait preuve d'habileté dans plusieurs autres productions, n'a pas voulu s'en rapporter à l'exactitude, peu assurée en effet, des effets du cordon qui peut glisser sur les pointes des poulies, ou y éprouver plus ou moins de pénétration et déplacer de quelques secondes, par son développement variable, l'instant de dégagement du remontoir, en désaccordant ainsi peu à peu les rapports des aiguilles. Ici, l'aiguille des minutes reste d'accord avec celle des secondes, ce qui ne serait pas arrivé si le rouage avait conduit la minuterie; car,

bien que cette pièce offre une marche plus que suffisamment exacte pour l'usage civil, cependant les époques de dégagement du remontoir n'y ont pas lieu à égales distances, et il est probable que, en faisant conduire la minuterie par la première force motrice, l'aiguille des minutes aurait été souvent en désaccord avec celle des secondes, par suite des glissements ou des différences de pénétration des pointes des poulies à l'égard du cordon. Mais, pour conserver en grande partie la construction actuelle et en éviter l'inconvénient, l'auteur aurait pu substituer au cordon une petite chaîne à la manière dite *de Vaucanson*, ou autre, ayant ses maillons à jour et très-corrects dans leurs distances : les pointes coniques des poulies, convenablement et également espacées, auraient pénétré dans les vides de la chaîne et en auraient prévenu le glissement. Avec une telle disposition, le grand rouage aurait pu conduire régulièrement la minuterie, et le mécanisme du remontoir aurait été exempté de cette fonction si peu convenable à son but, qui est d'agir uniquement et en toute liberté sur l'échappement. Nous avons suivi cette pièce pendant près d'un an, et nous y avons remarqué une marche fort régulière, au moins pour l'usage civil, auquel seul elle était destinée.

750. Cette Pendule offre en grande partie la pensée d'*Huyghens* et de *Leibnitz*, qui établissaient leur amélioration sur l'emploi d'un faible poids secondaire, avec contre-poids et corde sans fin ; il y a même été question d'une petite chaîne très-délicate ; mais *Berthoud* remarque qu'il n'a rien été transmis sur le mode particulier de dégagement ; c'est peut-être cette partie vicieuse qui aura fait abandonner si longtemps ce mécanisme. Les recherches modernes, en perfectionnant cette pensée et en s'efforçant de rendre le dégagement presque insensible sur les parties chargées de l'opérer, ont tendu de diverses manières à conserver à ce mécanisme les avantages que l'on désire en retirer, qui seraient notamment utiles dans les Pendules à ressort destinées à un certain degré de précision, où le tirage, généralement peu constant, des ressorts diffère en outre beaucoup du haut au bas ; on sait aussi que les Horloges publiques à poids, de grand ou même de moyen volume, sont sujettes à de grands frottements par la pesanteur des mobiles, et que la force motrice y devient d'autant moins régulière.

731. *Ferdinand Berthoud* rapporte à ce sujet le passage suivant d'un *Mémoire signifié par la communauté des Horlogers de Paris contre P. Rivas*, etc. ; « Il y est question, « dit-il, d'une ancienne Horloge d'Allemagne, faite vers 1600, et dont le balancier était à « *foliot*, ce qui prouvait son ancienneté ; elle appartenait à M. le président *de Lubert ;* « elle sonnait les heures et les quarts, et était astronomique, chose remarquable pour ce « temps. Les chevilles de la sonnerie remontaient à chaque quart le ressort du mouve- « ment contenu dans un petit barillet. Cette invention n'avait été appliquée à l'Horloge « par son auteur que pour lui donner plus de régularité, en faisant tirer le mouvement « par une force plus égale. »

732. « Si le fait que nous venons de rapporter est vrai, comme on n'en peut douter, « ajoute *Berthoud*, l'invention du *remontoir d'égalité* est fort ancienne, et l'Horloge faite « en Allemagne, vers 1600, est la première connue où cette invention ait été appliquée. » (*P. Rivas est cité comme amateur instruit d'Horlogerie et bon géomètre.*)

733. « Depuis la publication de cette belle idée par *Huyghens* et par *Leibnitz*, dit ailleurs *Berthoud*, divers artistes célèbres ont tenté de la mettre en pratique, entre autres *Sully* dans sa Pendule *à levier*, qu'il destinait à la détermination des longitudes en mer (et qui n'eut pas de succès). *Harrisson* a aussi employé le remontoir d'égalité dans sa Montre à longitudes qui remporta le prix accordé par le parlement d'Angleterre; mais « *nous ne pensons pas qu'aucun de ces artistes soit encore parvenu à donner à ce méca-* « *nisme le degré de perfection qu'il exige et que sans doute il comporte.* »

734. « Dans un mémoire présenté, en 1730, à la Société des arts de Paris, par M. *P. Gaudron*, Horloger, cet artiste donne la description et les dessins d'un remontoir d'égalité de sa composition, et c'est le premier dont tous les détails aient été jusqu'alors publiés. Car ni *Huyghens*, ni *Sully*, ni aucun des auteurs qui ont parlé de cette mécanique, n'ont donné le plan des remontoirs qu'ils ont proposés... Celui de *Gaudron* manquait son principal but par l'inégalité de trois engrenages, des frottements de six pivots, et ceux de l'échappement même. Cette seconde force motrice variait considérablement; et il eût été sans doute *préférable* d'employer tout simplement une fusée pour corriger les inégalités du grand ressort moteur, *et de supprimer un remontoir* dont le grand travail était en pure perte. » Nous avons fait observer précédemment que le principal but de ce remontoir était de prévenir le trop grand développement de la corde du poids, que l'on avait adapté à ces pièces de cheminée comme d'un effet d'ailleurs plus régulier que celui du grand ressort.

735. *Berthoud* cite ensuite un *remontoir* de *Mudge*, artiste anglais, et s'exprime à ce sujet comme il suit : « Dans le remontoir imaginé par M. *Mudge*, la force motrice secondaire est renouvelée à chaque vibration, de même que dans celui d'*Huyghens*; mais avec cette différence qu'ici le remontoir s'exerce par l'échappement même, au lieu que dans la construction d'*Huyghens*, il opère sur la roue d'échappement. La construction de *Mudge* nous a paru neuve et originale, et elle mérite une place distinguée parmi les inventions dont s'honore la science de la mesure du temps... La roue d'échappement n'y agit pas immédiatement sur le régulateur; mais, à chaque vibration, elle bande un ressort jusqu'à un point fixe et déterminé : ce ressort, au retour du balancier, est lâché de telle sorte, qu'en se débandant, sa force restitue au balancier celle nécessaire pour entretenir son mouvement; d'où il paraît que cette force doit toujours être constante, et doit imprimer au balancier la même action, et que celui-ci doit décrire des arcs constamment de la même étendue : tel est le principe ou le but que l'auteur s'est proposé. Nous examinerons jusqu'à quel point il a réussi; en attendant, nous devons convenir que cette idée est véritablement ingénieuse et très-séduisante. »

736. *Berthoud* consacre plusieurs pages à la description de cet échappement, que nous ne rapporterons pas ici, en partie par les mêmes raisons qui ont dicté à *Berthoud* la critique qu'il en fait ensuite en ces termes : « La combinaison de cet échappement peut « paraître séduisante; cependant on doit craindre qu'un mécanisme si compliqué et dont « les effets sont si subtils, ne puisse pas facilement être mis en usage; car il exige une « extrême précision d'exécution pour assurer ses effets, comme l'arrêt des palettes, la

« coïncidence exacte de l'axe des palettes avec celui du balancier. Les palettes du re« montoir augmentent les frottements du régulateur; deux pivots des palettes sont con« stamment en action pendant chaque vibration, ce qui revient au même que si le ba« lancier avait quatre pivots, etc. On observera, de plus, que le régulateur de M. *Mudge* « est composé de quatre ressorts spiraux, deux pour les palettes et deux pour le balan« cier; et ceux-ci doivent procurer l'isochronisme, car il est indispensablement nécessaire « que, dans une machine portative, les oscillations d'inégale étendue du balancier soient « isochrones : or, si elles le sont, le mécanisme du remontoir est inutile; et, si elles ne « le sont pas, la Montre variera (malgré le remontoir), lorsque, par des agitations et des « secousses, le balancier décrira de plus grands ou de plus petits arcs; et lorsque ces arcs « varieront, soit par les frottements des pivots, soit par le *changement de force des spi« raux par le chaud et par le froid*, etc. »

737. Le même auteur qui nous fournit ces extraits parle encore d'un échappement libre à remontoir, par *Charles Halley*, autre Horloger anglais. « Le but de cette in« vention, dit *Berthoud*, est de donner au balancier une force égale et invariable, malgré « les imperfections du ressort moteur et du rouage, ce que l'inventeur a obtenu d'une « manière simple, au moyen d'un *ressort*, avec un nouvel appareil placé entre la roue d'é« chappement et le balancier, et que le rouage remonte 150 fois par minute; et, comme « dans un train de 9,000 vibrations par heure il y en a 150 par minute, le balancier sera « frappé le même nombre de fois par ce *ressort de pulsion*. » Vient ensuite une assez longue description du mécanisme. Mais, bien qu'avec figures, le tout est presque inintelligible; car cette traduction de l'anglais, par *Berthoud*, offre le même inconvénient, qui se retrouve souvent, et peut-être avec intention, dans les explications et figures isolées des parties, chez plusieurs auteurs étrangers, outre que leurs idiomes sont toujours moins précis que la langue française en pareille matière.

738. On peut au total remarquer, à l'appui des objections de *Berthoud*, que ces inventions ne doivent pas avoir rempli le but que l'on en espérait, puisqu'on ne voit pas qu'elles aient été employées depuis, et l'on sait qu'après la durée du privilége de l'inventeur les idées d'un succès soutenu sont promptement imitées; en sorte que l'oubli qu'elles ont éprouvé peut indiquer assez justement leur imperfection. Ces remontoirs de *Mudge* et de *Halley* n'ont pas été employés depuis l'époque déjà ancienne de leur publication.

739. Une partie de ces objections, ou d'autres de même genre, peuvent être appliquées à la plupart des remontoirs imaginés depuis en divers pays, et dont plusieurs ont plus ou moins de rapport avec ceux de *Mudge* et de *Halley*. On a vu, en France, un échappement fort ingénieux de cette espèce attribué à un artiste capable et dit *à force constante et remontoir indépendant*, qui avait beaucoup d'analogie avec celui antérieur de *Halley*, étant sujet aussi à une partie des défauts remarqués ci-dessus par *Berthoud*. Le *ressort de pulsion* avait plus de force par le froid que par le chaud; ainsi déjà, sous ce rapport, la force n'était pas constante. On essaya vainement d'y remédier par l'adjonction d'une lame bimétallique; mais, en outre, l'étendue des arcs changeait suivant les positions, qui fai-

saient varier le poids et l'action de la pièce *à ressort de pulsion;* l'auteur de cette invention l'abandonna lui-même, comme bien d'autres idées.

740. Nous entrons ici dans un long examen des échappements *à remontoir*, pour avertir les artistes des chances auxquelles il les expose; nous ne prétendons pas que l'on ne puisse point y réussir, surtout en choisissant les cas de son application. Nous nous bornerons, du reste, aux observations actuelles sur ce sujet, qui n'empêcheront pas que nous ne donnions la description de quelques autres *remontoirs*. Nous croyons utile de prévenir que toutes les compositions compliquées de points de contact, qui, par les changements hygrométriques de l'air et d'autres causes physiques, contractent des adhérences variables, deviennent à la longue d'un effet inconstant dans un échappement, surtout en petit volume, où les forces ne sont plus proportionnelles aux effets physiques. Mais ce qui ne réussit pas dans certaines dimensions, peut être bon dans d'autres, et ces observations n'établissent pas que dans les Horloges de grande ou médiocre dimension, et même dans les Pendules à ressort (qui ne sont pas des régulateurs rigoureux d'observation), on n'obtienne d'un moyen simple de ce genre, des améliorations très-marquées, témoin la Pendule citée de *Robin*, qui, bien qu'imparfaite sous quelques rapports, était sensiblement exempte des écarts des Pendules ordinaires de la même dimension, malgré l'inégale pénétration des pointes dans le cordon.

741. On a remarqué, depuis un certain nombre d'années, un grand nombre de compositions ingénieuses de ce genre, tant en Angleterre que sur le continent, et dont les auteurs, d'un mérite d'ailleurs distingué, se sont facilement abusés dans leurs espérances. Les chances d'irrégularités sont si difficiles à prévoir, qu'elles échappent à l'auteur, à ses partisans et même à ses rivaux. L'avantage de certaines difficultés vaincues éblouit et ne laisse pas apercevoir les autres inconvénients d'une nouvelle disposition dont on n'a pas encore assez d'expérience. Au fait, on remarque très-peu de régulateurs d'observatoires et de pièces marines à longitudes avoir réussi avec des remontoirs, et avoir eu la constance que l'on obtient plus généralement dans les pièces bien soignées, soit avec les simples échappements libres en Montre, soit avec celui de *Graham* ou celui à chevilles et à repos, en Pendule; dans les pièces portatives de précision, on a vu très-peu de remontoirs qui aient offert une marche soutenue. Telle est du moins l'opinion de plusieurs artistes expérimentés, que nous nous bornons ici à recueillir.

742. Dans son *Traité des Horloges marines*, Berthoud, en critiquant lui-même avec assez de franchise son Horloge marine, n° 2, fait, entre autres, les remarques suivantes : « En faisant marcher cette Horloge, j'éprouvai des variations très-sensibles dans l'inter« valle même de 24 heures, le thermomètre restant au même degré. Je ne pus les attri« buer qu'à l'échappement dans lequel le plus petit changement dans la force motrice « causait des écarts considérables. Les grands arcs étaient plus prompts et les petits plus « lents. J'aurais dû dès ce moment proscrire cet échappement; mais, séduit par la pro« priété qu'il a de n'avoir point ou du moins très-peu de frottement, et surtout de « n'exiger pas d'huile, je m'opiniâtrai à vouloir le faire servir : c'est pour cette raison

« que, sans trop examiner un mécanisme anciennement connu et souvent employé, je « me déterminai à l'adapter à cette Horloge : je veux parler du *remontoir* inventé par « *Huyghens*, en 1675. »

« Le *remontoir*, disposé et exécuté avec soin, ne corrigeait point le défaut essentiel « que je voulais vaincre pour sauver l'échappement. Mes soins et mon travail furent em« ployés en pure perte; car les arcs décrits par le régulateur varièrent comme aupa« ravant, et même plus, en sorte que les variations de l'Horloge ne firent que s'accroître « par cette addition. Je ne rapporte ici que le précis des expériences faites à ce sujet, et « je ne parle même pas des tentatives que j'ai faites pour corriger le remontoir, en éga« lisant par une fusée la force du ressort auxiliaire (ou secondaire). Cette invention, « toute séduisante qu'elle a pu paraître en idée, est si défectueuse en réalité, que je re« grette beaucoup le temps employé à me détromper, fâché de ne l'avoir pas jugée avant « de me déterminer à l'exécuter. » Le même auteur dit un peu plus loin : « Si donc « on voulait donner à l'Horloge n° 2 toute la perfection dont elle pourrait d'ailleurs être « susceptible, il faudrait commencer par supprimer tout à fait le *remontoir*, comme *dé*« *fectueux*, *inutile et nuisible*, ainsi qu'il est bon de le faire voir ici : 1° Si le ressort auxi« liaire (secondaire) n'est pas remonté à chaque fois exactement dans le même temps, « il aura plus ou moins de force; or, le volant qui règle la vitesse du remontage tourne « *plus* ou moins vite, selon l'inégalité de la fusée du grand ressort, par le frottement du « grand ressort, l'inégale ténacité des huiles et les inégalités des engrenages; 2° les ex« périences que j'ai rapportées ci-dessus prouvent l'inutilité de ce mécanisme; 3° le re« montoir peut être *nuisible*, parce que les effets de ses détentes sont moins sûrs que « ceux d'un simple rouage. Ce mécanisme cause d'ailleurs une augmentation d'ouvrage « et beaucoup de difficulté d'exécution en pure perte, et dans aucun cas il ne peut avoir « d'application *utile*. »

743. L'échappement de cette Horloge marine, que, du reste, l'auteur a décrit d'une manière fort obscure et incomplète, paraît d'une espèce bizarre, où de larges assiettes ou plateaux portés par l'axe du balancier et armés de crochets à ressorts, occasionnent du recul à la roue de chevilles de l'échappement. C'est peut-être en raison du peu de succès de cette composition que *Berthoud* l'explique si peu ; mais on doit soupçonner, d'après ce qu'il en dit, que les défauts qu'il reproche au *remontoir* pouvaient bien appartenir en partie à l'échappement, et l'on peut ne pas adopter totalement les conclusions un peu brusques et exagérées d'un auteur mécontent de son propre ouvrage, et disposé à blâmer tout ce qui paraît y ressembler. Il y a grande apparence que *Berthoud* a fait sagement de renoncer à cette composition qu'on ne voit plus reparaître dans ses nombreuses et volumineuses tentatives pour la mesure du temps en mer. On n'en peut pas conclure absolument la condamnation des autres constructions des remontoirs, parce que celui-ci a été appliqué *bien ou mal* à un mécanisme vicieux, que son auteur a été forcé de rejeter. Les articles précédents de *Berthoud* contiennent aussi quelques contradictions : entre autres, que la pièce marine de *Harrisson*, qui a remporté en Angleterre le prix des longitudes, avait un *remontoir ;* il ne serait donc pas démontré que celui-ci fût toujours *nuisible*. Mais on pourrait

inférer d'après d'autres observations, et surtout d'après l'abandon de beaucoup de remontoirs, préconisés pendant un temps et oubliés ensuite, que ce mécanisme a rarement un succès constant dans les ouvrages délicats destinés à la plus grande précision. Cependant, si l'on redoute cette application dans de pareilles machines, où en effet elle a souvent substitué d'autres inconvénients à ceux qu'elle était destinée à corriger, l'expérience paraît aussi en confirmer le bon usage dans les Pendules ordinaires à ressort et dans les Horloges publiques de grand et de médiocre volume, puisque l'on voit plusieurs pièces de ce genre, à remontoir, conserver un certain degré de régularité égal tout au moins et souvent supérieur à celui des Pendules et Horloges simples de même force, et qui n'ont pas de remontoir. Il faut convenir de même que l'on ne trouve pas les mêmes avantages aussi assurés à l'égard des pièces marines, des chronomètres de poche et des Horloges astronomiques d'observatoire. *Au reste, nous ne prétendons pas défier l'avenir.*

744. Nota. Dans l'échappement compliqué et à recul de la pièce de *Berthoud*, la roue d'échappement roule librement sur l'axe de son pignon, et n'est menée que par un ressort secondaire en spirale, dont le centre est fixé à l'axe et l'autre bout à un piton rivé sur un rayon de la roue; le grand rouage conduit ce pignon et arme le ressort en spirale : ce même axe porte une étoile à 4 pointes dégageant, à chaque quart de minute, une bascule du volant modérateur du grand rouage. Cette pièce, qui n'a pu servir, fut déposée depuis au *Conservatoire des arts et métiers*. Le non-succès avoué par l'auteur a dû nous dispenser de plus longs détails; s'il ne prouve pas absolument contre d'autres dispositions, il faut avouer aussi, en définitive, que la susceptibilité naturelle de tout échappement, et l'inconstance fréquente des remontoirs, jointes à toutes les remarques précédentes, doivent, lorsqu'il s'agit d'observations rigoureuses, tenir en garde contre un genre de mécanisme si souvent repris et autant de fois abandonné, bien qu'il puisse, dans certains cas, offrir des avantages pour l'usage civil.

745. Cette même planche offre deux autres dimensions de Montres nos 3 et 4, d'un moindre volume que les deux précédentes, et nous pensons, avec des artistes expérimentés, que, pour avoir des ouvrages solides et pourvus de toutes les bonnes qualités du genre, on ne doit pas les réduire davantage; ces pièces paraissent toujours moins fortes à l'œil et à l'usage que dans la gravure : nous en avons déjà indiqué la cause. En Montres, comme en Pendules et en Horloges, certaines proportions ont reçu du temps toutes leurs perfections relatives, et l'on n'a pas de même l'expérience antérieure pour des grandeurs différentes. Le régulateur de trois pieds ou à secondes, par exemple, a réuni à la longue toutes les attentions; tandis que de plus longs pendules ont une surcharge de matière à laquelle on n'a pas encore porté remède, d'un autre côté, le *pendule* à secondes de 9 pouces n'offre pas non plus autant de régularité, faute de puissance, etc. Dans tous les cas, il est plus avantageux de s'appuyer sur l'expérience des temps antérieurs, et sur les bases qui l'ont procurée. Nous reprendrons ailleurs ce sujet, en exposant la théorie du *pendule*, les meilleures dispositions connues de sa *suspension*, les *conditions du rouage* d'un *régulateur*, de sa *force motrice*, etc.

Observations relatives à la planche XIX citée dans les articles précédents.

746. Dans la description précédente de la Pendule à remontoir de feu *Robin*, inédite jusqu'à ce jour, et digne cependant d'être citée, nous avons compté sur l'habitude acquise du lecteur pour suppléer à plusieurs explications de détail : de ce nombre est le cercle *h*, pointillé dans le haut du pont de volant, pl. XIX, et indiquant une cheville d'attente à tête goudronnée, habituellement logée à frottement dans son trou, marqué au centre de la tête, quand la cheville ne doit pas servir; mais elle peut se placer utilement dans un trou inférieur sur lequel passe actuellement le cercle pointillé. C'est alors que cette cheville, qui dépasse le dessous du pont, est employée à atteindre et arrêter momentanément le bras L du volant, quand les ressorts moteurs du rouage sont armés, et que l'on a besoin d'ajuster la *corde-sans-fin* pour établir une première fois la juste hauteur des poids du remontoir; après quoi la cheville doit être replacée dans son trou supérieur, où elle est actuellement dans la figure, pour laisser libre le mouvement du bras L et de son volant. Nous ne citons ce point que comme exemple de certaines explications accessoires, que le lecteur pourra trouver aisément par lui-même dans la suite.

747. Nota. Dans le modèle de Montre n° 3 de cette même planche XIX, où le cadran d'argent guilloché est percé de guichets pour les quantièmes, la roue de cadrature des mois porte un disque mince d'argent, où sont gravées, parallèlement au limbe, les lettres initiales de chaque mois; le centre de mouvement de cette roue est, sous le cadran, en un point correspondant au milieu du cercle des heures, entre les chiffres VIII et IX; son disque passe sous celui qui porte les noms des jours de la semaine gravés obliquement : ce second disque a son centre de mouvement sous la 37e minute. Une petite séparation entre ces deux guichets contigus paraissant n'en former qu'un seul, et qui est une continuité du plein du cadran, sert à couvrir la jointure des deux disques; celui des semaines, en dessus de l'autre, est logé dans une creusure pratiquée au cadran, en dessous. Une distribution analogue, quoique différente, a lieu pour les disques qui passent sous les guichets de quantièmes du n° 4, et se suppose si facilement, qu'il serait superflu de l'expliquer. On conçoit de même que l'excentricité des cercles d'heures et minutes dans ces deux cadrans a pour but de laisser plus de diamètre au barillet denté, afin d'avoir plus de tours de ressort et choisir ceux des tours du milieu qui offrent le moins d'inégalité dans leur force motrice.

748. Mais ce qui pourrait échapper plus aisément à l'observation, c'est la forme du rosillon des aiguilles de minutes, trop inexactement exprimées dans la gravure, qui rend difficilement les détails exigus de l'Horlogerie. Ces deux aiguilles de minutes n'ont point ici de carré pour la clef; elles n'en ont pas non plus du côté de la cuvette, comme on en voit aux calibres *Lépine*. Ici, le rosillon a sa rondeur interrompue par un élargissement opposé à la naissance de la tige de l'aiguille : cette partie, plus large, est percée d'outre en outre et hors du centre d'un petit trou bien carré, qui

reçoit l'extrémité bien carrée aussi d'une petite clef pleine. En roulant celle-ci entre les doigts, quoique droite et nullement coudée, elle force le rosillon à tourner sur son centre, comme par un effet de manivelle. Ce petit moyen adroit, et qui paraît appartenir à feu *Bréguet*, peut être employé, lorsque le frottement de l'aiguille n'est pas trop dur, pour supprimer le carré ordinaire, quand la hauteur manque, principalement dans les pièces plates si généralement défectueuses sous tant d'autres rapports. On emploie aussi quelquefois une clef pleine de cette espèce, mais plus forte, pour le remontage de la force motrice. Dans ce cas, l'arbre de barillet, ou de fusée, est percé d'un trou carré d'abord jusqu'à moitié, et ensuite continué rond et plus petit jusqu'à l'autre bout, pour le nettoyer plus aisément. Le carré plein de la clef, n'ayant plus besoin d'être aussi gros, permet au pivot ou tourillon de l'arbre de ce côté de n'être pas sensiblement plus fort qu'à l'ordinaire, et le bout de l'arbre, côté du carré, arrivant ainsi à fleur du cadran ou de la cuvette, en remplit l'ouverture, et empêche l'introduction des corps étrangers. Ces petites dispositions modernes de détail ne sont pas nouvelles pour plusieurs artistes, et nous n'en faisons ici mention que pour ceux qui ne les connaissent pas.

DE LA CADRATURE D'ÉQUATION.

749. La première cadrature d'*équation* dont il soit fait mention dans l'*Histoire de la mesure du temps* fut remarquée, en 1699, dans une Pendule du cabinet de Charles II, roi d'Espagne; cette Pendule était de construction anglaise; *Sully* en fait mention dans sa *Règle artificielle du temps*, publiée vers le commencement du 18e siècle, en 1717, et ajoute que, vingt ans avant, il avait exécuté en Angleterre une des premières *Montres à équation*. On a composé depuis un grand nombre de cadratures de ce genre, diversement construites. Nous en décrirons quelques-unes, dont le principe général, une fois bien compris, suffira pour l'intelligence de toutes celles que l'on pourra rencontrer, quoique différentes.

750. Nous commencerons par l'équation d'une sphère de *Passemant*, habile Horloger de la fin du 18e siècle. Si ce n'est pas la meilleure, elle est du moins une des plus faciles à concevoir : elle donne le temps moyen uniforme, et le temps vrai ou solaire et inégal, par deux aiguilles de minute concentriques au grand cadran. En portant l'aiguille du temps moyen sur sa minute, celle du temps vrai arrive en même temps à sa véritable place, suivant l'équation de l'époque, déterminée par une courbe annuelle irrégulière, une sorte d'ellipsoïde, mue par des roues de cadrature.

La figure 1 de la planche XX représente le profil de cette cadrature, d'autant plus clairement que les mobiles y sont les uns au-dessus des autres, moyennant plusieurs canons qui s'emboîtent sur le même axe; ils prennent ainsi beaucoup trop de hauteur, mais la forme ancienne de cette Pendule le permettait aisément. Nous donnerons à la suite des constructions moins hautes, propres à être pratiquées dans la *Montre*.

Une première roue AD, portant un bras en équerre ADEF, est mobile sur un canon

d'acier très-court, partant du milieu de CB, et fixé à l'intérieur de la platine par deux vis CB. Le canon d'acier et sa plaque forment ensemble comme une seule pièce. A travers ce canon passe l'axe de la roue de longue tige, ou des secondes, si elles sont concentriques, sans autre frottement que celui de son pivot dans un bouchon placé à l'extrémité antérieure du canon de CB, alors plus long; mais ici nous supposons d'abord la roue de longue tige au centre et les secondes placées sur un cadran excentrique. Ce canon n'est pas visible, parce qu'il est recouvert par la roue AD; cette roue et son équerre roulent librement sur la partie saillante hors de la platine du canon de CB, sur lequel elles ne font qu'environ un demi-tour. Dans ce cas, la roue AD est menée par un râteau denté, qui est supposé ici derrière la figure par une disposition analogue à celle des figures 2 et 3, ou un râteau VMX engrène aussi avec une roue de même espèce, TT. Ce râteau, qui se retrouve dans plusieurs cadratures d'équation, et qui appartient ici à une construction que nous décrirons plus loin, a pour fonction d'appuyer constamment, au moyen d'un ressort quelconque, son bras M sur une courbe telle que MPONN, portée par une roue annuelle; celle-ci, par une suite d'engrenages ou par d'autres moyens, ne fait qu'une révolution par année; les côtés élevés et ceux déprimés de la courbe font élever ou laissent abaisser le râteau, ce qui fait tourner à droite ou à gauche, suivant l'époque de l'année, et d'environ un demi-tour en tout, la roue AD et son équerre EF, fig. 1, à laquelle nous revenons. Cet effet est représenté en plan pour la roue TT de plus grande dimension, et appartenant aux figures 2 et 3, qui offrent un autre mécanisme d'équation. Dans la figure 1, l'extrémité de l'équerre porte en F un pignon qui engrène à la fois avec deux roues de champ, MM et IK. (*Leurs dents sont ici trop longues.*)

L'axe de la roue de longue tige, en sortant du canon de CB, porte à frottement gras la roue de champ GH, placée là comme une chaussée, et sous laquelle est une autre roue plate PL, qui ne sert pas ici et n'y est supposée que pour être menée par un pignon du rouage dans le cas de secondes concentriques, comme dans la planche XVIII.

La roue GH engrène avec le pignon H, roulant sur un axe porté par l'extrémité d'un autre pont inférieur à deux retours d'équerre en LH, et fixé par une vis et deux tenons sur le dehors de la platine. Ce même pignon H engrène aussi avec la double roue de champ MM, dont le canon roule librement sur celui de la première roue de champ GH. Cette roue MM a le même nombre de dents que la roue GH, et fait comme elle une révolution par heure, mais en sens contraire, par l'effet du pignon H.

La denture supérieure (du côté du cadran supprimé ici) de la double roue de champ MM fait aussi rouler le pignon F de l'équerre du haut, supposée pour le moment immobile, ainsi que sa roue DA, et ce pignon F fait marcher la troisième roue de champ IK dans le sens ordinaire, à droite, c'est-à-dire dans le même sens que la première roue GH.

Le canon O de la roue IK, qui roule librement sur le premier canon de chaussée, porte l'aiguille S du temps solaire, qui, dans l'état actuel d'immobilité de l'équerre ADEF, marche en même temps et avec même vitesse que l'aiguille T du temps moyen, portée plus en dehors par la chaussée. En sorte que, si l'on met à la minute l'aiguille supérieure

du temps moyen, on fera marcher de la même quantité l'aiguille solaire, parce que les trois roues de champ sont dentées des mêmes nombres.

U est une petite roue centrale, ou plutôt un pignon menant une roue latérale de renvoi, dont le pignon conduit une roue de canon portant l'aiguille des heures. Cette roue n'est pas représentée ici pour dégager la figure, et, ne concernant que la menée de l'aiguille des heures, il est aisé d'y suppléer en la plaçant à portée. *L'axe de l'aiguille* T *entre à carré forcé dans le canon de chaussée de* GH.

751. Nous avons supposé immobiles jusqu'ici la roue AD et son équerre; mais on conçoit aisément que le râteau, que nous avons dit devoir se trouver en arrière du mécanisme dans cette figure et engrenant avec la roue AD, étant déplacé d'un angle quelconque par une courbe annuelle, fera mouvoir en avant ou en arrière le pignon F, indépendamment des roues MM et GH, qui suivront leur marche ordinaire par la progression naturelle du mouvement de la Pendule en train de marcher. Mais, en supposant que les deux dentures de champ MM et IK, qui se regardent, soient divisées chacune sur le même nombre 64 et que le pignon F soit de 8 ailes, on voit que, si le bras DEF recule du côté du spectateur d'un angle de 45°, ou d'un demi-quart de tour, dans son mouvement de droite à gauche, le pignon F roulera sur son axe en faisant pénétrer successivement ses 8 ailes dans son engrenage avec la roue MM, restant immobile ou du moins retenue en place par le pignon H et la roue HG, supposés sans mouvement; or, ce pignon, lors même qu'il ferait ce mouvement sans rouler sur la roue MM, étant seulement engagé avec la roue IK, entraînerait celle-ci en arrière avec lui, et aussi d'un demi-quart de tour; mais, comme le pignon roule en même temps dans un sens à faire reculer d'autant la roue IK par son seul engrenage avec elle de 8 dents qui produisent aussi un demi-quart de tour, il s'ensuit que, le recul du pignon d'un demi-quart de tour, avec engrenage sur la roue MM, ayant de plus son engrenage de 8 dents avec la roue IK de 64 dents, ces deux effets feront ensemble reculer IK d'un quart entier de tour, c'est-à-dire d'un mouvement angulaire double de celui de transport du pignon F autour de la roue MM. Ainsi l'aiguille S de temps solaire, montée sur le bout O du canon de la roue IK, reculera de même d'un quart de tour ou de 90°, pour les 45° de déplacement du pignon F.

Il en sera de même lorsque le bras du râteau, toujours pressé par un ressort quelconque contre la courbe, descendra sur les côtés de celle-ci les plus rapprochés du centre de la roue annuelle. Le pignon F, en avançant dans ce cas contraire de gauche à droite, fera avancer de même la roue IK d'une quantité double du mouvement angulaire de l'équerre, et par la même double cause de la rotation du pignon et de son transport. Or, ces mouvements de retard ou d'accélération sur la roue IK et sur son aiguille se feront indépendamment de la marche habituelle de la minuterie, et auront pour effet de modifier continuellement la distance entre les deux aiguilles de temps moyen et de temps vrai, suivant le contour de la courbe annuelle, déterminé par les diverses quantités de l'équation. On peut, par exemple, supposer que dans le premier moment les deux aiguilles étaient d'abord l'une sur l'autre à la même minute, et que l'équation était

zéro, le bras inférieur du râteau étant alors appuyé sur un degré moyen entre les deux extrêmes d'abaissement et de relèvement de la courbe ; celle-ci, en suivant sa révolution annuelle et son rayon augmentant peu à peu, fera rétrograder l'aiguille de temps solaire, qui retardera de 14 minutes et 33 secondes vers le 10 février sur celle du temps moyen. A une autre époque, au commencement de novembre, le plus grand abaissement de la courbe fera, au contraire, avancer l'aiguille solaire de 16 minutes et 17 secondes ; et, dans le cours de l'année, l'aiguille solaire sera ramenée quatre fois sur l'aiguille de temps moyen, c'est-à-dire à zéro, aux quatre époques où la différence des deux temps est nulle.

752. Il nous reste à donner une idée générale de la manière de tracer la courbe ellipsoïde annuelle qui détermine la quantité d'équation. Cette courbe est centrée et fixée *provisoirement* sur une roue pleine annuelle conduite par la cadrature, soit continuellement, soit une seule fois par jour, à midi ou à minuit; soit de 3 en 3 ou de 5 en 5 jours, suivant le mode adopté. La plaque de la courbe doit être éloignée au moins d'une ligne de la roue sur laquelle elle est maintenue parallèle, afin que la gorge de la poulie qui termine le bras ordinairement inférieur du râteau, celui de droite de la figure 3, puisse être placée comme à cheval sur le bord de la courbe, quand elle sera taillée, sans frotter aucunement à la roue annuelle. Cette plaque sera d'abord préparée de même grandeur que sa roue, sauf la denture de celle-ci qui sera en plus.

753. On déterminera d'abord la course de la poulie du râteau toujours accompagné de son ressort et de son bras de levier M, de manière à faire avancer l'aiguille solaire de 16 minutes 17 secondes après midi; et l'on marquera sur la plaque le point de distance et d'attouchement de la gorge de la poulie. On marquera également la distance du râteau qui fait reculer l'aiguille solaire de 14 minutes et 33 secondes en arrière de midi, puis on marquera le point du râteau pour midi juste. On fera passer trois cercles par ces trois points, en prenant pour centre celui même de la roue annuelle. On divisera le plus grand cercle en 365 parties, ou en 120 avec un petit reste, ou en 73, suivant que l'on aura déterminé les époques de progression de la courbe. On tirera de toutes les divisions des rayons au centre, mais bornés au cercle le plus intérieur, le surplus vers le centre devenant inutile. Ces rayons se trouveront divisés en deux parties inégales par le cercle intermédiaire tracé en CC. Sur l'un d'eux, et sur sa moitié la plus courte, on établira une division de 14 parties et demie, et l'autre moitié plus grande sera divisée en 16 parties et 3/4. On prendra pour chaque rayon autant de parties avec fraction que la table d'équation indiquera de minutes et secondes pour chaque jour, et on les portera successivement sur les rayons dans le sens où ils doivent se succéder; alors on tracera une courbe passant par chaque point marqué, et l'on découpera la plaque ellipsoïde suivant ce tracé. C'est le moyen donné par quelques auteurs; mais il faut observer, pour l'exactitude, qu'un rayon droit n'est pas celui que parcourt le point de contact de la poulie, et qu'il faudrait établir les divisions pour la quantité d'équation sur des portions de cercle tracées par le bras de râteau lui-même, dans son mouvement angulaire depuis le plus grand cercle jusqu'au plus petit, et qu'on peut d'ailleurs perdre sensiblement de

précision par le jeu des pièces. Nous allons indiquer un moyen pratique plus sûr et plus exact.

754. On disposera d'abord le râteau pour porter à l'extrémité du bras M, au point correspondant juste à celui de contact du fond de la gorge de la poulie, un petit pointeau d'acier trempé et tourné. La poulie ne sera placée qu'après coup dans sa chape, à laquelle on réservera la matière nécessaire pour porter l'un et l'autre. Ces mesures et proportions peuvent y être combinées et préparées à l'avance. On établira la minuterie complète d'équation en place; on établira aussi sur la platine un limbe en demi-cercle bien centré, et remplaçant le cadran dont il portera les divisions en minutes, à partir de celle de 60 jusqu'à 17, tant en avant qu'en arrière, et correspondant juste aux divisions semblables du cadran réel; on établira le râteau avec sa bande de ressort comme pour le faire appuyer contre sa courbe; enfin, on établira aussi sur un endroit opportun de la platine une vis de rappel de longueur à pouvoir faire parcourir au râteau ses plus grandes excursions, et dans un sens à agir sur lui comme le ferait la courbe elle-même sur la poulie du bras M. On verra, par la suite, qu'il faut aussi entre certaines roues de la minuterie un léger ressort de barillet très-bas, pour éviter le jeu des engrenages; nous en expliquerons le placement plus tard, mais nous le supposons ici déjà établi. Tout étant ainsi bien préparé, on fera marcher le bras M, au moyen de la vis de rappel, de manière à faire arriver l'aiguille de temps solaire à la distance de midi, indiquée par la table d'équation pour le 31 décembre, par exemple, et l'on frappera d'un léger coup de marteau le pointeau pour marquer un point sur la plaque. On marquera particulièrement ce point comme 31 décembre. Si la roue annuelle change tous les jours, ou tous les trois ou cinq jours, on la fera marcher de l'une de ces quantités, et, ayant conduit par la vis de rappel l'aiguille solaire à son degré d'équation, on marquera un second coup de pointeau pour le deuxième jour ou autre période déterminée, et l'on continuera ainsi pour tout le pourtour de l'ellipse, en ayant soin d'y marquer les points de chaque dernier jour du mois et le nom du mois, et les nos 30 ou 31, ou 28. On aura ainsi une suite de points par lesquels il sera facile de découper la plaque d'une manière plus juste et qui portera par elle-même la correction de toutes les inégalités d'engrenage et du mécanisme. On placera ensuite convenablement la poulie, que l'on tiendra la plus petite possible, c'est-à-dire bien moins grande que dans la figure 3, attendu que les côtés les plus rampants de la courbe, ayant leurs points de contact un peu obliques au bras de la poulie, exigeront une petite modification des points de la courbe que l'attention indiquera en opérant. En laissant un peu trop de matière, l'épreuve avec la poulie indiquera de légères corrections bien moindres qu'avec la méthode précédente, où l'extrémité du bras M ne trace pas sur la courbe un rayon droit, mais une portion de cercle qu'il faut longuement diviser en minutes, comme il a été dit, indépendamment des autres inexactitudes des engrenages et du jeu des pièces qu'on ne peut apprécier d'avance. On peut encore ajouter à cette méthode pratique d'autres précautions que nous laissons au choix des amateurs de la précision.

755. Si le pignon F était une roue plate engrenant avec une autre MM, plate aussi et

non de champ, et si ce mobile F avait porté sur son axe une autre roue plate d'un nombre déterminé, engrenant avec une seconde roue centrale et plate aussi, en place de celle de champ IK, les mêmes effets auraient pu avoir lieu, suivant les proportions angulaires voulues par les nombres ou les circonférences; c'est ce que nous verrons pratiqué dans d'autres équations qui n'occupent pas en hauteur autant de place que ces engrenages de champ, outre le désavantage particulier à cette sorte d'engrenage. Mais il y a encore d'autres défauts dans cette construction que nous n'avons expliquée que comme plus facile à comprendre, pour la première fois que l'on s'occupe d'équation. Elle préparera du moins à l'intelligence des suivantes, ou d'autres plus compliquées. (*Les dentures trop en peigne de la figure 1 ne sont pas ici pour modèle.*)

ÉQUATION PAR UN CADRAN MOBILE ET UNE SEULE AIGUILLE.

756. Au lieu de faire marcher deux aiguilles, comme dans la construction précédente et par la combinaison de plusieurs roues de cadrature, on peut en éviter l'emploi en se servant de la même aiguille de minutes pour indiquer les deux temps, au moyen d'un petit cadran TT, fig. 2, mobile au centre et à fleur du grand cadran fixe ordinaire, que l'on fait évider pour cette construction, ou que l'on fait émailler exprès. Il faut toujours dans ce cas une courbe ellipsoïde portée par une roue annuelle; le râteau VV engrène directement dans une roue fixée simplement sous le petit cadran mobile; *mais ici le cadran doit marcher à rebours de l'aiguille solaire* (V. fig. 2, pl. XX); le limbe du petit cadran porte au bord une seconde division des minutes, avec ses chiffres en dedans de son cercle, comme on le voit dans la même figure. Par cette disposition, la seule aiguille de minute parcourt à l'ordinaire, par son mouvement propre, les minutes du temps moyen, et quant aux minutes du temps solaire, elles se remarquent au travers de la lunette de l'aiguille, garnie en cet endroit d'un petit index en 15. Cette disposition est plus simple et plus applicable aux *Montres* à équation; c'est aussi celle qu'on y a longtemps pratiquée. La roue TT et la partie au trait du râteau sont en dessous des deux cadrans, et vus ici comme au travers de ces pièces supposées transparentes.

757. Mais on a évité depuis l'emploi incommode d'un petit cadran de rapport qui n'est pas très-facile à ajuster proprement, surtout dans une Montre, et qui est toujours un mobile fort pesant, en faisant marquer l'équation par une aiguille longue et mince, dont l'axe est près du bord du cadran, sur le côté, et dont la pointe parcourt sur le fond du cadran, vers son milieu, un arc de chiffres légers entremêlés de points. Ce moyen, le plus moderne de tous, embarrasse moins aussi le cadran. L'axe de l'aiguille y est toujours conduit sous le cadran par un bras appuyé sur une courbe d'équation, portée dans la cadrature par une roue annuelle; celle-ci peut même avoir sa révolution quadriennale, c'est-à-dire comprenant les bissextiles. Nous en donnerons plus loin la figure. Une aiguille opposée marque de même le quantième.

758. Les figures 2 et 3 de la planche XX indiquent la disposition des pièces d'un ca-

dran mobile, pour le principe; mais on peut les distribuer autrement, suivant la place disponible, pourvu qu'elles produisent le même effet. SS, fig. 2. est le petit cadran mobile; TT est sa roue placée en dessous de ce même cadran, qui est fixé et centré par ses pieds. Le limbe du grand cadran QR, plus large que dans la figure, doit porter entre ses minutes et celles du cadran mobile son cercle des heures, qui n'a pas été représenté ici pour mieux faire distinguer le déplacement relatif du cercle des minutes mobiles; mais celles-ci sont immédiatement au-dessous des heures, et l'aiguille de minutes doit avoir sa flèche d'autant plus longue au-dessus de sa lunette garnie dans le bas d'un petit index intérieur, et dans le vide de laquelle on aperçoit le chiffre 15.

759. Le râteau VVMX a son bras M appuyé sur la courbe MNNOP, fig. 3; la poulie M doit être beaucoup plus petite que dans la figure, pour le motif déjà expliqué (754). Une autre ellipse LFKI, figurée en dessous de la précédente et d'une courbure un peu différente, comme d'une teinte plus obscure, ne fait pas partie du mécanisme du cadran mobile: elle n'est représentée ici que pour indiquer qu'elle peut être aussi tracée par la division du grand cercle AMB, ainsi qu'il a été dit; mais cette seconde ellipse concerne une autre méthode d'équation ci-après, dont nous allons nous occuper.

760. Au temps du *P. Alexandre*, auteur d'un de nos plus anciens ouvrages sur l'Horlogerie (*Traité générale des Horloges*, 1739), lorsque l'on suivait généralement le temps solaire inégal, comme on le pratique encore aujourd'hui dans plusieurs provinces, il fallait déplacer continuellement les aiguilles et l'effet de sonnerie, qui suivent naturellement un temps égal, pour leur faire indiquer les irrégularités du soleil (on sait que ces variations solaires sont périodiques et reviennent les mêmes chaque année, dans la même saison); le *P. Alexandre* avait proposé de faire varier la longueur du pendule, proportionnellement aux variations solaires, au moyen d'une courbe annuelle soulevant un levier qui élevait plus ou moins la suspension du pendule fixée à ce levier, au-dessus d'une pince fixe traversée par les ressorts de suspension, la longueur du pendule ne se mesurant que depuis la pince, considérée comme l'axe réel des oscillations, jusqu'au *centre de percussion* ou d'oscillation de la masse totale. Cette méthode fut bientôt améliorée en rendant la pince mobile, par son établissement sur le levier lui-même, tandis que le point d'attache restait fixe; de cette manière, le levier n'était plus chargé du poids du pendule, et la roue annuelle fonctionnait d'autant plus librement qu'on pouvait allonger encore le bras de levier appuyé sur la courbe, en donnant à celle-ci une plus grande dimension et plus de justesse. La courbe du *P. Alexandre*, étant près de la suspension, présentait une forme ovale dont les divers diamètres différaient peu; mais, lorsqu'on éloigne la courbe de la suspension, en allongeant le levier, ses inégalités plus considérables produisent la courbe LFKH, fig. 3, dont nous avons déjà parlé, et qui est représentée sous l'autre avec une teinte plus foncée dans les parties sortantes, et dont le reste est pointillé sous la courbe supérieure tracée seule pour un cadran mobile.

761. Enfin, pour éviter la roue annuelle et sa courbe, *Lepaute* proposa depuis un autre

moyen analogue; c'est celui d'un petit cadran représenté, fig. 4, pl. XX, divisé en 50 parties, et sur lequel on promène une aiguille fixée à un écrou de vis, qui soulève plus ou moins le point où sont attachés les ressorts de suspension, ceux-ci glissant toujours dans une pince fixe. La progression des filets de cette vis doit donner 24 filets, juste pour la longueur d'un pouce. Alors, un demi-tour de l'écrou peut allonger ou accourcir le pendule d'un quart de ligne, ou de 0,25/100es, et changer la marche du pendule de 25 secondes en 24 heures, à raison d'un 100 de ligne par seconde (plus exactement, ce serait sur 1/98e à très-peu près par seconde en 24 heures, qu'il faudrait établir ce calcul).

762. La division de la circonférence de ce cadran est surmontée de chiffres qui, à partir du zéro vers lequel se trouve l'aiguille dans la figure 4, croissent également de chaque côté, et se croisent même pour les chiffres 29 et 30, placés en avant de leur division, comme ceux 20 et 21, où la division prolongée passe entre deux nombres; on pourrait aussi faire ce cadran un quart plus grand, pour laisser plus de place aux chiffres. Le 0 est pris pour le point de longueur du pendule, qui donne la même marche qu'un jour *moyen* solaire, ce qui arrive à quatre époques de l'année; l'aiguille doit donc y être ramenée quatre fois par an. Quant aux autres époques marquées sur le cadran, on y place l'aiguille aux numéros du bord correspondant au quantième écrit, où elle reste jusqu'à la date suivante. Celles marquées d'une étoile indiquent quand il faut rétrograder pour le changement de la date où l'aiguille doit être portée, et suivant l'ordre des mois. C'est ainsi que le 15 septembre, par exemple, étant suivi d'une étoile, indique qu'il faut rétrograder pour conduire l'aiguille sur la division du 8 octobre, et continuer de rétrograder au 16 octobre, au 22 octobre, etc., jusqu'au 25 décembre, où l'aiguille se trouvera sur le n° 20 du bord *correspondant au chiffre* de la date; après le 25 décembre, dont l'étoile avertit de ne pas aller plus loin dans le même sens parcouru, l'aiguille doit être ramenée au 10 janvier, et suivre en ce sens les dates de ce mois et celles de février jusqu'au 25 mars, correspondant au n° 19 du bord, et dont l'étoile avertit de rétrograder après au 12 avril, et ainsi de suite.

763. Cette méthode est, en effet, fort simple; mais il est douteux que l'assujettissement qu'elle entraîne et la difficulté de ne pas en oublier les époques soit préférable au travail d'une équation à ellipse et roue annuelle, qui, une fois établie, dispense de surveiller sous ce rapport le réglage continuel d'une Horloge ou d'une Pendule. Le cadran horizontal est praticable néanmoins pour une Horloge publique que l'on va remonter tous les jours, et dans laquelle ce cadran peut aisément être à portée de la vue, parce que le pendule descend ordinairement plus bas que le sol sur lequel l'Horloge est placée; mais pour un régulateur à secondes et à poids, dont la suspension est toujours plus élevée que l'œil de l'observateur, il serait fort incommode de diriger l'aiguille sur son cadran horizontal, ne fût-ce que par la gêne occasionnée par la boîte, et, de plus, on pourrait compter d'avance sur l'oubli fréquent des époques de son changement. D'ailleurs, la régularité relative de cette courbe devient ici très-difficile, et nécessiterait

des retouches qu'il faudrait éprouver pendant plusieurs jours et plusieurs centaines de fois.

764. Cette disposition, assez ingénieuse au premier coup d'œil, et dont l'emploi pourrait tenter un artiste amateur, avait été modifiée de la manière suivante par un artiste dont la main habile secondait la tête instruite, par feu M. *Bourdon* (1), de Mâcon (auprès duquel nous avons commencé et complété notre apprentissage volontaire, mais dans une autre ville, capitale de province); il avait placé verticalement ce même cadran d'équation au-dessus du cadran ordinaire d'un régulateur simple; le pendule y était déjà placé sur le devant, sous le cadran; sa tige formait dans la cadrature un cercle évidé autour des canons de minuterie, et assez grand pour ne pas toucher aux canons des aiguilles. Le cadran d'équation, gravé par l'artiste lui-même, était en vue, au moyen d'une lunette pratiquée à la boîte au-dessus de celle accoutumée, la main pouvait y atteindre aisément et l'œil être averti des époques; il y avait de plus une table des dates suspendue dans l'intérieur de la boîte, en avant d'une corde sans fin qu'il fallait remonter une fois par semaine. Ces moyens pouvaient prévenir l'oubli du déplacement de l'aiguille de réglage; celle-ci faisait mouvoir alors, non pas un écrou ni une vis, mais un limaçon vertical dont la courbe rampante uniformément n'avait de degré qu'après un tour entier, qu'il n'était pas nécessaire de dépasser (comme dans le cadran de *Lepaute*); car il était divisé en 54 parties, pour éviter le croisement des chiffres remarqué ci-dessus et pour fournir l'espace nécessaire à la largeur du bec de levier appuyé sur le limaçon : celui-ci avait sa progression en spirale réglée suivant la proportion déjà indiquée; cette spirale pouvait avoir plus de régularité première et exigeait moins de retouches. La pince des ressorts de suspension était fixe, et le levier qui soulevait ou abaissait les ressorts était placé au milieu, au-dessus du mouvement, et dirigé horizontalement vers le fond de la boîte, où il se terminait en T, portant ses pivots ou points d'appui sur deux pièces écartées et attenantes aux angles de la deuxième platine du fond. Cette disposition produisait le même effet que les précédentes, avec l'avantage de tenir le cadran à portée de la main comme de la vue. Mais, au total, outre la difficulté de régler convenablement la courbe ou le limaçon, on s'accordera généralement à préférer une équation qui change par la marche même de la Pendule, et dont la

(1) Feu M. *Bourdon*, fils d'un avocat distingué de Mâcon, avait fait de bonnes études de collége, et avait reçu une sage éducation de famille. Il s'était occupé d'abord de géométrie, dessin, peinture, musique, etc.; enfin, une adresse naturelle remarquable tourna définitivement ses goûts vers l'Horlogerie; studieux, laborieux et intelligent, il se détermina à faire un apprentissage en Suisse, d'où il rapporta dans sa patrie une rapide instruction pratique, avec une belle collection d'excellents instruments à l'usage de son art; il joignait l'habileté de la main-d'œuvre à la bonne théorie. Modeste autant que capable, il s'était établi Horloger dans une capitale de province fort tranquille, où nous eûmes l'avantage de faire avec lui une connaissance intime, malgré la grande disproportion d'âge. Ses talents naturels auraient pris un plus ample développement sur un plus grand théâtre. Il était sans ambition, probe, honnête et toujours occupé, et ne dérobait quelques instants à son art que pour feuilleter les volumes d'une petite bibliothèque bien choisie. Nous devons notre première éducation artistique à cet excellent homme. Il se retira enfin à Mâcon, sa ville natale, où il a terminé une carrière honorable en y laissant une veuve et deux enfants.

roue annuelle offre aisément, comme nous l'avons déjà dit ailleurs, l'avantage d'un quantième annuel qui porte la différence des mois.

CADRATURE D'ÉQUATION BISSEXTILE OU QUADRIENNALE.

765. Nous n'avons exposé jusqu'ici que des constructions d'équation annuelle, moyenne entre deux bissextiles et servant communément pour les quatre années, avec une différence de secondes peu importante. Pour terminer ce qui concerne les compositions variées de ce genre, et présenter aux yeux comme à l'esprit un exemple d'application de la méthode des *rouages* dits *satellites*, nous décrirons ici en détail une cadrature d'équation bissextile, dont le développement achèvera de faire concevoir ce mécanisme. La construction suivante est une des meilleures de *F. Berthoud.* Le même auteur en a établi de plus simples à cadran mobile, et particulièrement en Montre. Nous dirons aussi deux mots sur ce mécanisme dans les Montres pour compléter ce sujet, en attendant un autre moyen plus moderne; *Berthoud* donne encore ailleurs une autre équation qui paraît être entièrement de sa composition, mais dont l'exécution difficile et plus susceptible de manquer, nous empêche de la recommander ici. La courbe annuelle y est divisée en degrés, ce qui nécessite que le bras du râteau soit soulevé d'avance par le rouage, chaque fois que le point de la courbe doit être changé; une étoile, ayant une vingtaine de pointes longues et délicates, comme des pattes d'araignées, y est rencontrée, tantôt au-dessus, tantôt au-dessous, par deux chevilles d'un bras en T, mû par la cadrature avec une exigence de précision qui rend cette construction trop compliquée et peu solide. La disposition en est ingénieuse et assez différente de celles ordinaires; mais l'auteur lui-même la condamne dans le même sens que nous; elle n'offre, en effet, pour tout avantage que de ne pas ressembler aux autres. Cette idée, au fond, ne nous paraît pas heureuse, en ce qu'elle présente des difficultés sans utilité réelle, comme la cadrature à répétition de *Stagden*, que nous avons donnée avec la même observation. La cadrature suivante présente plus de solidité, et n'exige pas plus de travail; du reste, elle est facile à concevoir comme à exécuter, en y portant une suffisante attention. On sait, d'ailleurs, qu'en Horlogerie les moindres combinaisons doivent être parfaitement senties et fidèlement exécutées; cet art veut partout de la précision et de la *sûreté;* il n'admet point les *à peu près.*

766. La planche XXI, fig. 1, représente le dessus de la platine des piliers vue par sa face extérieure, celle qui est sous le cadran supprimé ici, pour laisser la minuterie à découvert, et dont on n'a représenté qu'une partie du limbe des heures et minutes, aux environs seulement du point de 60. Il faut d'abord bien remarquer que la petite roue *mm*, au centre de la platine, dont elle est la plus rapprochée des trois qui occupent le centre, représente celle de la chaussée d'une minuterie ordinaire, et dont la révolution est d'une heure. Le canon de cette roue *mm* porte *l'aiguille de minutes du temps moyen*, soit que la chaussée soit à frottement sur la longue tige de la roue du centre, quand il n'y a pas

de secondes au centre, soit que cette même chaussée roule librement sur un canon d'acier fixé à la platine, et au travers duquel passe l'axe de la roue d'échappement pour porter une aiguille de secondes concentriques; mais alors la minuterie est ordinairement menée par quelque pignon d'une tige du rouage, et ce pignon sort au travers de la platine pour porter son pivot dans un pont sous le cadran, comme on le voit dans notre planche XVIII de la première partie; ici, pl. XXI, les secondes sont excentriques et sur une autre place du cadran.

Dans la cadrature actuelle, on doit remarquer aussi une roue H, la plus basse de toutes, recouverte par une plaque en forme de bras HI; cette plaque, chargée à son extrémité I de deux roues *op*, superposées et fixées ensemble au même canon, est susceptible de faire une demi-révolution, en roulant elle-même sur un tourillon fixé à la platine. C'est le râteau RO, engrenant dans la roue de dessous H, qui produit ce mouvement dans lequel l'axe ou broche des roues *op* est entraîné suivant le cercle ponctué *xx*. (*Il y a ici deux aiguilles de minutes, une pour chaque temps.*)

Une autre roue centrale *vv*, rivée à un canon qui porte l'*aiguille du temps solaire*, roule librement et séparément sur le canon de chaussée. Un pont B porte un troisième canon qui enveloppe celui de la roue *vv* sans y toucher, pour porter la roue des heures *c*, afin que le poids de ce dernier mobile ne porte pas sur la roue *vv* et sur son canon pour l'aiguille solaire. Nous allons rapporter ici la description même de *Berthoud*, ainsi que nous en avons fait copier les figures. Les premiers paragraphes de l'auteur répètent à peu près ce que nous venons de signaler.

767. « Pour concevoir cet effet (celui du rapprochement et de l'écart des aiguilles de temps vrai et de temps moyen), il faut imaginer, dit *Berthoud*, une roue ordinaire des minutes, comme *mm* (V. notre pl. XXI, fig. 1), dont le canon porte l'aiguille M du temps moyen, et que, sur le canon de cette roue, la roue *vv* peut tourner séparément; enfin, il faut concevoir que cette roue *vv* est fixée sur un canon dont le bout porte l'aiguille V, qui sera celle du temps vrai (ou solaire).

768. « Il ne s'agit donc que de faire éloigner ou rapprocher chaque jour cette aiguille V de l'aiguille M, selon les quantités que marque la table d'équation pour tel jour, et par ce moyen on aura une Horloge à équation.

769. « Pour y parvenir, on a disposé, fig. 1, les roues *n*, *o*, *p*, *r*, de façon qu'elles engrènent les unes dans les autres, comme on le voit dans la figure, c'est-à-dire que la roue *m* du temps moyen engrène dans la roue *n*, qui a le double de dents et de diamètre; celle-ci engrène dans la roue *o*, qui n'a que la moitié du nombre des dents de la roue *n*, et qui fait par conséquent un tour par heure, comme la roue *m*. Sur la roue *o* est fixée la roue *p*, qui engrène dans la roue *r*, dont l'axe tourne dans le canon de la roue *n*, mais séparément. Cette roue *r* engrène dans la roue *vv* du temps vrai. Les roues *p*, *r*, *vv* ont le même nombre de dents; ainsi elles font chacune une révolution en une heure, tandis que la roue *n* reste deux heures à en faire une.

770. « Les axes des roues *op* sont placés sur la broche I*l* de la pièce IH, dont on voit le profil, fig. 2; et cette pièce IH se meut autour de l'axe de la roue *n* par le moyen

du râteau RRR et de la roue H; elle peut décrire plus d'un demi-tour en emportant les roues *op*, qui peuvent par conséquent aller de *p* vers *z* ou vers *x*.

771. « Or, lorsque la roue *o* est ainsi entraînée, et qu'elle décrit une demi-circonférence, elle fait un tour (1) sur elle-même, indépendamment de la roue *n* : la roue *p* fait aussi un tour sur elle-même; mais, parce qu'elle est plus grande que O, elle fait tourner les roues *r* et *vv* : ainsi, tandis que les roues *n* et *m* du temps moyen restent immobiles, la roue du temps vrai *vv* peut avancer ou reculer avec son aiguille solaire, selon le côté vers lequel on fait tourner la pièce IH.

772. « On peut donc, selon le mouvement que l'on donne à cette pièce IH, faire avancer ou retarder plus ou moins l'aiguille du temps vrai, celle du temps moyen restant immobile. Voici comme on règle le mouvement de cette pièce.

« La roue AA fait une révolution en une année juste : elle porte fixement la courbe ou ellipse E, sur laquelle appuie la roulette O, portée par le levier QLR, dont le centre de mouvement est en L; or, selon les points où la roulette O porte sur la courbe, le râteau RR fait avancer ou reculer la pièce IH, et par conséquent l'aiguille du temps vrai V se rapproche ou s'éloigne d'un côté ou de l'autre de l'aiguille du temps moyen M. Il faut donc former cette courbe ou ellipse de manière qu'à tel jour de l'année, le temps vrai étant en avance ou retard d'un certain nombre de minutes à l'égard du temps moyen, la pièce IH écarte d'autant l'aiguille V de l'aiguille M : on verra ci-après comment on doit tracer cette courbe; mais d'abord il est à propos d'achever la description des autres parties de cette machine. (*Pour la courbe, voir* 752-754.)

« Au bras IH est fixé, avec la roue M, un *cuivrot*, ou poulie *pp*, fig. 2, laquelle est entourée par une corde D, fig. 1, dont un bout est fixé à la poulie et l'autre au ressort FD, ce qui fait appuyer continuellement la roulette O sur l'ellipse. Comme les engrenages des roues *m*, *n*, *o*, *p*, *r*, *vv* ont nécessairement du jeu, et que cela forme un ballottage qui produirait une erreur pour l'équation, il faut fixer aux roues *m* et *v* un ressort spiral S qui presse continuellement l'aiguille V du même côté; or, pour rendre ce ressort très-faible, il faut mettre l'aiguille V d'équilibre, au moyen d'un poids opposé. (*C'est le petit ressort de Montre très-bas, cité art.* 754.)

« La pièce IH, fig. 2, se meut sur la platine autour du canon *aa*, vu fig. 3, dont le rebord *aa* sert de pont. Ce canon est fixé à la platine au moyen des vis *aa*, fig. 2; il est placé concentriquement aux roues *r*, *n*, fig. 1 : pour cet effet, le trou de ce canon est assez grand pour laisser passer librement les axes de ces roues. La roue *n* est rivée sur un canon roulant librement sur la tige de la roue *r*.

« La roue *r* est rivée sur un pignon *t*, lequel engrène dans la roue *c* de cadran.

« On n'a pas représenté, pour la clarté de la figure, un pont ou coq, qui forme une

(1) « Il faut observer que, quoique la roue *p* fasse un tour sur elle-même, elle ne fait cependant pas faire un tour à la roue *r*, mais seulement un demi-tour; car il faut soustraire du tour entier fait par la roue *o* ou *p* la demi-circonférence parcourue concentriquement aux roues *n* et *r*. Ainsi, lorsque l'on fait décrire à la pièce IH, ou aux roues *op* qu'elle porte, une demi-circonférence autour de l'axe de la roue *n*, les roues *vv* et *r* font aussi une demi-révolution » (*Note de Berthoud.*)

espèce de cage avec la platine et dans laquelle tournent les roues *r*, *n*. B est le pont de la roue de cadran (ou d'heures).

« S'il y a une sonnerie à une telle Pendule, on peut lui faire sonner le temps vrai ou le temps moyen. Si l'on veut faire sonner le temps vrai, il faut que ce soit la roue *vv* qui porte les chevilles des détentes : si l'on veut qu'elle sonne le temps moyen, ce sera la roue *mm*.

« Nous observerons que, dans une Horloge à équation de cette construction, on peut placer l'aiguille des secondes au centre des autres aiguilles, ou hors du centre ; si ces aiguilles sont concentriques, alors la tige de la roue des secondes devra passer à travers un pont à canon P*u* (V. notre pl. XVIII, fig. 3 et 7), sur lequel roulera librement le canon *no* qui doit porter la roue *m* du temps moyen, dont l'ajustement est parfaitement semblable à celui de la Pendule à secondes concentriques déjà décrite (V. chap. x, art. 693 et suiv.), *aux dimensions près*.

« Voici maintenant, continue *Berthoud*, le moyen que j'ai imaginé pour faire mouvoir la roue annuelle. Il est tel, que, sans employer plusieurs roues, on n'est point obligé de toucher à la roue annuelle dans les années bissextiles ; ainsi elle fait une révolution exacte, et la Pendule marque juste les quantièmes du mois et les années bissextiles.

« La roue annuelle A est fendue à rochet et porte 366 dents ; elle est maintenue par le sautoir S. L'axe prolongé d'une roue de la sonnerie (ou du mouvement) qui doit faire un tour en 24 heures, porte la palette P, qui, à chaque tour, fait avancer une dent de la roue annuelle, qui par conséquent emploie 366 jours à faire une révolution, ce qui fait le nombre de jours des années bissextiles ; mais, comme les années communes ne sont que de 365 jours, il faut faire passer à chaque année de 365 jours deux dents de la roue annuelle en un jour, savoir la nuit du 28 février. Voici comment cet effet est produit.

« Tout près de la roue annuelle se meut l'étoile T, entre la platine et le coq X, lequel est tout près du cadran. Cette étoile a 8 dents ou rayons, qui sont maintenus par le sautoir ou valet 3, 4, sur lequel agit le ressort *f*. L'étoile porte un cadran Y, sur lequel est gravé *année bissextile*, et *première*, *seconde*, *troisième année*. Chacune de ces divisions paraît chaque année au travers de l'ouverture faite à la plaque du grand cadran des heures, et sert à faire connaître l'année bissextile ou les années communes. *L'étoile saute 2 fois, en 2 époques de l'année, comme on va le voir.*

« La roue annuelle porte une cheville qui atteint une dent de l'étoile lorsque le 1er janvier répond à l'index du milieu du cadran ; cette cheville sert à faire avancer l'étoile d'une dent pour changer le numéro d'année. La même roue annuelle porte une seconde cheville, qui rencontre une dent de l'étoile lorsque le 28 février arrive sous l'index, et fait tourner encore une dent de l'étoile ; mais, derrière cette seconde cheville, il y en a une troisième, et la dent suivante de l'étoile tombe dessus en achevant d'obéir à l'action du sautoir, en sorte que, l'étoile qui avait d'abord été menée par la roue annuelle, sert elle-même à faire avancer en ce moment la roue d'une dent de plus, en faisant passer

deux jours à la fois du quantième, c'est-à-dire les 28 et 29 février, pour passer au 1er mars, car la roue porte 366 jours, en y comprenant le 29 février, qui ne s'arrête pas sous l'index du milieu du cadran pendant trois ans. Mais à la quatrième année, dite bissextile, la huitième dent de l'étoile est entaillée comme on le voit dans la figure, et, bien qu'elle obéisse comme les autres à l'effet du sautoir, cette entaille de la dent du sautoir fait qu'elle n'atteint point la troisième cheville, et qu'elle laisse la roue maintenir pendant 24 heures, le 29 février, sous l'index du cadran. Cet effet approche de celui de la surprise des Montres à répétition, et il faut que le ressort du sautoir 3, 4 soit assez fort pour surmonter la résistance de l'autre sautoir inférieur S, qui est toujours suffisante pour empêcher la roue de se déplacer. La proportion est facile à établir, et les équations de ce genre que j'ai exécutées ont toujours bien produit leur effet. »

773. *Berthoud*, excellent pour son temps, comme nous l'avons dit souvent, et bien plus capable que d'autres qui, depuis, ont eu plus de vogue, est ordinairement simple, clair et sans affectation de style ; mais ces détails sont si difficiles à expliquer et à bien entendre, que nous avons cru devoir y ajouter plusieurs mots explicatifs. Ce dernier paragraphe y occupe plus d'une page, et nous essayerons plus loin de l'éclaircir davantage. Ces effets d'équation, compliqués par le transport des mobiles, exigent du lecteur une attention particulière, et de les relire lentement, avec méditation.

« L'objection que l'on pourrait faire à cette manière de faire mouvoir la roue annuelle, c'est qu'elle ne se meut pas continûment, et que par conséquent l'équation, qui change insensiblement sans discontinuer, reste ici la même les trois quarts du jour. J'en conviens : cependant, la plus grande variation d'un jour à l'autre ne pouvant être que de 30 secondes, et cela seulement dans les derniers jours de décembre, il arrive en effet que, le changement se faisant à midi, l'équation de l'aiguille diffère un peu de celle véritable du temps pendant le reste d'un jour, mais, comme l'erreur qui en résulte serait à peine aperçue sur un cadran de 10 pouces, elle peut bien être négligée. Au reste, on peut aussi conduire par un mouvement continu la roue annuelle taillée alors, non en rochet, mais en dents coupées obliquement sur l'épaisseur, et propres à une vis-sans-fin faisant son tour en un jour.

« Si l'on veut employer à la progression continue et presque insensible de la roue annuelle un rouage qui lui procure une révolution astronomique, c'est-à-dire celle de 365 jours 5 h. 49′, qui diffère infiniment peu du vrai, on se servira des nombres suivants : la roue de cadran ou des 12 heures portera un pignon de 8 ailes, et la roue menée par ce pignon aura 50 dents ; celle-ci portera un pignon de 7 qui engrènera dans une roue de 69 ; cette dernière portera encore un pignon de 7, qui mènera une roue de 83, laquelle sera la roue annuelle et restera 365 jours 5 h. 49′ de temps moyen à faire une révolution. »

Ces nombres sont tirés du Cours de mathématiques de *Camus*, et, si *Berthoud* les eût employés ici en place de la seule action diurne de la palette P, ce n'aurait pas été sans quelque modification probable ; car le pignon de 8, formé en dehors du gros canon de la roue des heures, aurait eu ses ailes trop volumineuses. D'ailleurs, suivant le principe

géométrique, les pignons menants de 7 et de 8 ne peuvent avoir un excédant qui conduise avec uniformité; cet excédant devient trop allongé dans les pignons de bas nombre pour permettre les rentrées. On est obligé d'en altérer et réduire la hauteur ogive, et alors la menée n'est plus uniforme. Sous ce rapport, un pignon de 16 et une première roue de 100 conviendraient mieux. Il faudrait modifier de même les deux autres engrenages. Cette remarque, au reste, concerne l'extrême régularité de menée, toujours préférable, mais peu observée dans ces ouvrages et dans bien d'autres, où les pignons de bas nombre sont malheureusement employés si généralement; quant à ceux-ci, à leurs mesures si peu exactes, ainsi qu'à leur forme défectueuse, comme celle des dentures, etc., c'est aux artistes adroits et intelligents à en tirer le parti que l'expérience leur suggère, et nous en traiterons aussi dans les articles du rhabillage, qui exige beaucoup de sagacité pour pallier les défauts avec le moins de frais possible.

On peut observer encore que la courbe et la progression de l'aiguille d'une équation bissextile manquent un peu de précision, par suite du déplacement subit d'une dent à chacune des trois années moyennes, pour passer du 28 février au 1er mars, puisque la division du cercle annuel porte constamment son 29e jour de février pour la 4e année, lequel doit disparaître pendant trois ans, par l'effet de sautoir. Enfin, les mécanismes connus d'équation, ne pouvant comporter généralement l'indication exacte des secondes, ne sauraient servir aux calculs astronomiques; et, pour l'usage civil, l'équation *moyenne* est suffisante. Dans celle-ci, on pourrait encore suppléer à l'absence de la division du 29 février par la mobilité de l'index, déplacé alors d'un jour au 1er mars, à chaque 4e année bissextile, jusqu'au nettoyage obligé de l'Horloge, époque où l'index serait reporté à sa première place.

774. Pour une révolution moyenne continue de 365 jours seulement, quelques auteurs ont adopté les nombres suivants : un pignon de 16 à la roue de chaussée, et menant une 1re roue de 192; celle-ci porte un pignon de 24 menant une 2e roue de 120, qui porte un pignon de 10 menant une 3e roue encore de 120, laquelle porte un pignon de 12 menant la 4e roue annuelle de 146, où est fixée la courbe d'équation et la platine mobile, divisée en 365 jours, le mois de février n'en ayant alors que 28. Ces pignons sont souvent *comme à lanterne*, c'est-à-dire formés de chevilles d'acier simplement implantées sur les mobiles; les pignons à ailes mèneraient plus uniformément, mais la différence est dans ce cas peu importante; ce sont ici les petits bras de levier qui agissent sur de beaucoup plus grands, et les engrenages où les pignons mènent les roues n'opposent qu'une résistance presque insensible.

En décrivant dans son *Essai* la cadrature précédente, *Berthoud* n'a pas donné les nombres ni les diamètres des mobiles; il revient sur ce sujet dans un autre ouvrage, et nous en extrayons les paragraphes suivants pour compléter ces articles :

« La roue de conduite *mm* (celle de chaussée de 36 dents et de 9 lig. et 7/12e de diamètre) engrène dans la roue d'équation *n* qui a 72 dents et 19 lig. 1/2 de diamètre; cette roue *n* est rivée sur un canon qui roule librement sur l'axe du pignon *t* (les nombres sont ici beaucoup plus importants que ces diamètres déterminés d'après les

mesures vulgaires des ateliers. Ce sont, en effet, les nombres qui doivent rectifier définitivement les dimensions des mobiles, tandis que les diamètres donnés ici ne sont utiles que pour l'ébauche, en les tenant d'abord et par précaution un peu plus grands.)

La roue d'équation *n* engrène dans la roue *o*, qui a 36 dents et 9 lig. 7/12 de diamètre (comme celle de chaussée *mm*); la roue *o* est rivée sur un canon qui porte fixement en dessus la roue *p* : l'une et l'autre, ne faisant ainsi qu'une seule pièce, roulent sur une broche portée en I par le bras I*r*H, mobile concentriquement au pignon *t*. La roue *p* a 60 dents 14 lignes 5/12 de diamètre, et engrène dans la roue *r* de même nombre et diamètre que celle *p*.

La roue *r* (comme un mobile de renvoi) est rivée sur le pignon *t* de 8 ailes menant la roue de cadran ou de canon *c*, qui a 96 dents et 26 lignes de diamètre; le canon de cette dernière roue porte comme à l'ordinaire l'aiguille des heures. La roue *r* engrène dans la roue *vv* qui fait un tour par heure; cette roue *vv* a aussi 60 dents et 14 lignes 5/12 de diamètre, comme celles *p* et *r*, et porte un canon roulant librement sur celui de chaussée ou des minutes *mm*; ce canon de la roue *vv* porte l'aiguille V du temps vrai ou solaire.

« La roue ou pignon H, fixée en dessous au bras HI et que mène le râteau LR, a 47 dents et 7 lignes 1/2 de diamètre; le râteau est fendu sur le nombre 360; son rayon de L en R est de 27 lignes 8/12.

« Les dents à rochet de la roue annuelle AA sont pressées en P par un ressort à sautoir S, fixant la roue qui n'avance que d'une dent en 24 heures. Pour faire mouvoir ou tourner la roue annuelle, j'emploie, dit *Berthoud*, un moyen fort simple : c'est celui d'une palette P (en forme de virgule retournée), portée à carré sur le pivot d'un pignon de 14 dents; ce pignon engrène dans la roue du barillet de sonnerie de 84 dents, et il fait un seul tour par jour, le barillet ne faisant sa révolution qu'en 6 jours; ainsi chaque révolution du pignon de la palette P fait avancer la roue annuelle d'une dent. Nota. *Les figures 2 et 3 sont à réduire à leurs vraies dimensions de la figure 1.*

« Le cadran de cette Pendule d'équation a 8 pouces de diamètre; il est d'émail et porte au milieu, au-dessous du centre, une ouverture garnie d'un petit index, où se voient le quantième du jour et le nom du mois, peints sur un cercle d'émail porté par la roue annuelle. (On préfère aujourd'hui faire graver les divisions sur la platine circulaire blanchie d'argent et portée par cette roue, pour éviter l'inexactitude du centrage d'un cadran peint.) Le grand cadran est percé sur le côté d'une autre ouverture qui laisse voir l'indication des années *bissextiles* et *moyennes* du petit cadran Y, qui se déplace deux fois par an, étant porté par l'étoile à sautoir, à 8 points T, de la figure 1, pl. XXI.

« Le barillet de sonnerie de 84 dents faisant son tour en 6 jours, six tours du ressort moteur font marcher la sonnerie pendant 36 jours; ce ressort doit pouvoir faire 8 tours et demi, afin de n'être pas trop fort ni sujet à casser. »

Quant à la première roue du cylindre pour le *mouvement*, elle fait un tour en

57 heures 6/7. Ainsi, le cylindre ayant 14 tours de corde (de boyau), le mouvement marche 33 jours et 18 heures. On peut se régler comme il suit, pour déterminer le diamètre de ce cylindre; sa corde est *mouflée* en bas par une poulie dont la chape est accrochée au poids : en supposant 5 pieds de hauteur sous la cage, dont 1 pied doit être déduit pour la longueur du poids et de sa poulie, il reste 4 pieds ou 48 pouces de descente. La longueur de la corde mouflée, et par conséquent double, est donc de 8 pieds, ou 96 pouces, qui, divisés par 14 tours de cylindre, laissent à celui-ci très-peu moins de 7 pouces de circonférence, ou à très-peu près 26 lignes de diamètre ; mais, à cause de la grosseur de la corde (d'environ une ligne) et de son allongement, on ne peut guère donner pour sûreté que 24 lignes de diamètre, au fond de la cannelure en vis pratiquée pour ranger les tours de corde. *Berthoud* assigne au diamètre de son cylindre 25 lignes 3/4, au moyen d'une proportion ou règle de trois, suivant le rapport de *Metius* (113, diamètre, à 355, circonférence, proportion beaucoup plus approchée que celle de 1 à 3+1/7); mais il néglige l'allongement de la corde, ce qui rend inutile l'exactitude de ce calcul. Il est plus sûr, dans la supposition de hauteur ci-dessus, de ne laisser que 24 lignes de diamètre au fond de la cannelure, et de tâter la quantité de poids nécessaire, pour donner au pendule suffisamment lourd, comme de 10 à 12 livres, des arcs entiers de 3° à 4°.

775. La disposition et les nombres des mobiles de cette dernière cadrature d'équation de *Berthoud* étant actuellement connus, nous allons en essayer l'explication par un raisonnement un peu long, exigeant de l'attention et une certaine contention d'esprit, et que, pour cette raison sans doute, aucun des auteurs connus n'a jugé à propos d'aborder. Nous allons pour cela reprendre une partie de la description précédente.

Il faut d'abord se rappeler qu'il y a ici deux plans, et pour ainsi dire deux étages des mobiles, de dimensions différentes pour l'équation, quoique sur les mêmes centres, et en partie comme dans les minuteries ordinaires; que la roue *mm* du plan inférieur teinté de dessous, dont le canon porte l'*aiguille* M *du temps moyen*, engrène avec la roue *n* de dessous aussi, qui conduit la roue *o* inférieure, et rivée au même canon que la roue *p* supérieure; que la roue *r* de dessus est libre et indépendante de la roue *n* de dessous; que cette roue *r* de dessus mène librement la roue *vv* de dessus aussi, dont le canon porte l'*aiguille* V *de temps vrai ou solaire.*

Il faut encore considérer, pour simplifier la question, que toutes les dentures sont ici de même grosseur, et que, conséquemment, les vitesses des circonférences sont entre elles comme les nombres, et dans les mêmes rapports qu'ont entre eux les diamètres ou les rayons respectifs.

776. On a déjà vu que la roue *mm* de dessous, de 36 dents, qui est la chaussée, *et porte l'aiguille* M *de temps moyen* à droite, tourne en une heure, et conduit la roue *n* de dessous, de 72 dents, tournant en deux heures à gauche, et menant la roue *o* encore de dessous et tournant en une heure à droite, comme celle de chaussée. Il s'ensuit que la roue *p* de dessus, de 60 dents, et d'autant plus grande que la roue *o*, au canon de laquelle *p* est fixée et rivée, que cette roue *p*, disons-nous, tourne aussi en une heure et à

droite, et fait faire dans le même temps un tour à gauche à la roue *r* de dessus aussi, de même nombre et diamètre, laquelle fait tourner à droite la roue *vv* de dessus. encore de même nombre et grandeur que *p* et *r*, et portant l'*aiguille* M *de temps vrai ou solaire.* Ainsi, sous ce seul point de vue, les deux aiguilles M et V pourront se suivre et marcher avec la même vitesse, en conservant entre elles la distance quelconque qu'elles auront primitivement reçue; cela suppose que, pendant leur marche ordinaire, le râteau ne change pas la situation du bras HI, fixé sur la roue H, presque cachée pàr ce bras dans la figure, et roulant, comme on sait, sur un tourillon creux de la platine; on sait aussi que c'est au centre de ce tourillon que passent, et la tige de *r*, et le canon de *n*, indépendants et roulant librement l'un sur l'autre, sans frotter au dedans du tourillon de H, lequel est fixé par vis et pieds à la platine.

777. Mais, en faisant maintenant abstraction du mouvement diurne propre à ce système de roues, et que nous pouvous supposer arrêté pour le moment, si le râteau occasionne en une fois un quart de tour, par exemple, au bras HI, en le déplaçant d'un angle de 90°, dans le sens de zRx, la roue *n* ne sera pas affectée de ce mouvement et restera immobile, parce que son canon passe librement au travers du tourillon de la platine, et que cette roue *n* est retenue par la chaussée *mm* que nous venons de supposer arrêtée, ou du moins ayant une marche insensible et considérée pour le moment comme nulle. Or, par l'effet du râteau, le bras I aura fait parcourir à la roue *o* un quart de tour ou 18 dents de la roue *n* immobile de 72, et comme la roue *o* n'a que 36 dents, elle aura fait dans sa translation, sur un quart de la circonférence de *n*, un demi-tour sur son axe propre, par son engrenage de 18 dents consécutives, avec les 18 qui forment le quart de la roue *n* de 72, restée immobile, comme étant retenue par la chaussée.

778. La roue *p* de dessus et de 60, fixée et rivée sur *o* de 36, aura donc été forcée aussi de faire un demi-tour sur elle-même, tout en n'ayant parcouru qu'un quart de la circonférence de la roue *r*, c'est-à-dire l'espace de 15 dents de cette roue *r* qui en a 60; mais, comme ces deux roues *p* et *r* engrènent ensemble, et ont même nombre et même diamètre, la roue *p* n'aura pas seulement fait engrener 15 de ses propres dents avec autant de la roue *r;* mais encore cette roue *p* ayant dû faire avancer 15 autres de ses dents de plus, pour compléter le demi-tour forcé que lui a fait faire la roue *o*, à laquelle *p* est liée, il s'ensuivra nécessairement que *r* étant engrenée avec *p*, et de même nombre et diamètre, cette même roue *r*, au lieu de rester immobile comme *n*, aura dû rétrograder à gauche de ces mêmes 15 dents, puisque, en ne parcourant qu'un quart de la circonférence de *r*, *p* a fait passer 30 dents. Et ce mouvement à gauche de 15 dents de *r* fera tourner à droite sans difficulté *vv*, portant uniquement l'aiguille du temps solaire et n'opposant pas de résistance.

779. On conçoit que la roue *p* de dessus, plus grande que *o* de dessous et d'autant plus nombrée, a aussi d'autant plus de vitesse à sa circonférence, et fait passer d'autant plus de dents sur la ligne commune des centres des deux engrenages, que n'en fait passer la roue *o;* et que, d'ailleurs, la circonférence de *p* avance deux fois plus à droite qu'elle

n'engrènerait de dents avec la circonférence de *r*, si cette même roue *p* roulait librement sur *r* immobile, et sur laquelle *p* ne se développerait alors que d'un quart de tour, ou de 15 dents, par sa translation libre de 90°, ou d'un quart de tour ; car, dans cette translation d'un quart de tour de la circonférence de *r*, et qui n'est que de 15 dents, *p*, fixée à *o*, est forcée de faire jusqu'à un demi-tour par l'engrenage de *o* sur *n*, retenue immobile par la chaussée ; *p* doit donc rouler sur elle-même à droite de 15 dents de plus qu'il n'en passerait dans son engrenage libre avec *r*, et comme *r* est libre ainsi que *vv*, il s'ensuit que *r* de 60 dents est obligée de rétrograder à gauche de ces 15 dents, ou d'un quart de son tour, ce qui fait avancer d'autant à droite la roue *vv* portant l'aiguille solaire, et de même nombre et diamètre que *r* et *p*. Si donc cette aiguille V ou salaire a été primitivement en arrière de 15 minutes de l'aiguille M de temps moyen, elle aura marché à droite de cette même quantité, ou d'un quart de tour, pour se retrouver au-dessus de M et à la même minute, par l'action du râteau que nous avons supposé avoir occasionné au bras HI un mouvement angulaire d'un quart de tour ou de 90° à droite.

780. On voit, en effet, que les deux roues de dessus *p* et *r* sont égales en diamètre comme en nombre (60 dents), et que si la roue *p*, détachée de *o* roulait librement et uniquement sur un quart de la circonférence de *r*, retenue en place par sa seule inertie, *p* y engrènerait de 15 dents, en ne faisant alors qu'un quart de tour sur elle-même, tandis que *r* resterait immobile. Mais la roue *o* de dessous et de 36 est forcée de faire, non un quart de tour, mais un demi-tour sur elle-même par son engrenage sur *n* de 72 fixée par la chaussée censée immobile, et la roue *p* fixée à *o* est aussi forcée de faire, par cette raison, non un quart de tour, mais un demi-tour sur elle-même dans le mouvement angulaire de 90° de HI ; ainsi, cette roue *p*, qui ne ferait autour de *r* qu'un quart de tour à droite par son seul engrenage avec elle, est forcée de faire dans le même temps et sur le même quart de circonférence, ou sur 15 dents de *r*, un quart de révolution de plus, et en tout une demi-révolution, à cause de *o* ; par conséquent, *p* fait reculer *r* de ce même quart de tour ou de 15 dents, puisque *r* est libre, à son inertie près, et de même nombre et diamètre que *p* ; or, *r*, reculant à gauche d'un quart de tour, fait avancer *vv* à droite de la même quantité, attendu que ces trois roues de dessus ont même nombre et mêmes diamètres.

781. Ces derniers paragraphes ne sont guère qu'une paraphrase les uns des autres. Un seul suffra pour certains lecteurs ; mais, comme ils rappellent chacun quelques rapports de détail qui auraient embrouillé dans un seul, ils peuvent ensemble éclaircir cette question naturellement compliquée. En pareil cas, il est souvent utile de revenir avec différents développements sur les mêmes idées pour en faire mieux apercevoir tous les rapports.

782. Les explications de ce genre sont, en effet, plus longues que quelques lignes de chiffres, car la question se réduit ici, d'une part, à une première division de la distance entre les centres de *n* et de *o*, mobiles inférieurs, et en proportion de leurs nombres ou de leurs rayons ; et, d'autre part, à une seconde division de la même distance, propor-

tionnelle aux deux rayons *p* et *r* des mobiles supérieurs, et à en conclure les vitesses des circonférences, ou quantités de mouvement, ou les arcs parcourus dans les différentes révolutions, et il est facile d'en réduire l'équation en formule générale; mais, en calculant simplement l'effet des mobiles de translation, les formules peuvent être appliquées quelquefois sans être bien comprises, comme les simples règles de proportion que la routine emploie souvent sans les entendre; l'analyse raisonnée éclaircit plus sensiblement l'esprit de la méthode, que l'on doit ensuite appliquer au moyen du calcul. Mais ce n'est pas ici le lieu de nous étendre sur ce sujet, qui appartiendra mieux à nos calculs futurs pour les nombres des rouages.

783. Ce mécanisme, soit d'accélération, soit de retard, car il a également lieu en sens contraire, s'effectue ici sans altérer la progression ordinaire du temps moyen, et se borne à ajouter un + (*plus*), ou à retrancher un — (*moins*) à la marche du temps vrai, suivant le sens du déplacement, en avant ou en arrière du râteau qui, d'après le mode adopté pour le mouvement de la roue annuelle, agit presque insensiblement pendant les 24 heures, au moyen d'un rouage continu, ou en une seule fois par jour au moyen d'une palette et d'un sautoir, comme dans la figure, et la plupart du temps d'un petit nombre de secondes, ou d'une demi-minute au plus, vers les époques des plus grands changements dans l'équation.

784. On peut donc déjà concevoir, par cet exemple, comment une roue transportée avec engrenage autour d'une *première* circonférence dentée, ou roue centrale déjà en mouvement, peut avoir : 1° ses révolutions modifiées par la progression propre de la roue à laquelle elle engrène; et que, 2°, si la roue transportée en porte sur son axe une autre, de nombre ou de grandeur différente, engrenant avec une *seconde* circonférence ou seconde roue centrale, il en peut résulter pour cette seconde roue centrale une accélération ou un retard, relativement à la *première*, et proportionnellement aux mouvements angulaires ou à l'étendue des arcs, pour un temps donné, déterminés par les nombres et diamètres de chacun de ces mobiles, et que l'on peut ainsi arriver, comme le dit *Janvier*, à la détermination exacte d'une vitesse exprimée par une fraction quelconque, et pour laquelle il faudrait souvent un grand nombre de mobiles combinés pour n'atteindre encore qu'une approximation.

785. C'est à cet artifice ingénieux, déjà ancien, rencontré ou imaginé, mais appliqué avec beaucoup de talent dans ces derniers temps, et utilement rappelé, que l'on a donné le nom de *roues satellites;* cette dénomination n'est pas tout à faite exacte, puisque les satellites, comme notre lune, présentent toujours la même face à leur planète centrale, ce que n'offre pas la méthode en question, et que, dans notre système général, ce sont les planètes qui, pendant leur translation autour du soleil, roulent sur elles-mêmes comme les mobiles transportés dont il s'agit. Le nom de *roues planétaires* aurait peut-être mieux convenu. *Antide Janvier* observait, en 1827, que M. *Pecqueur* avait fait des applications particulières de cette méthode, et il ajoutait que la plus remarquable n'était pas encore justement appréciée. (*Recueil de machines, dédié au jury central*, etc.)

Remarques sur quelques articles précédents.

786. En rapportant les nombres assignés par *Berthoud* aux mobiles de cette Pendule à équation, nombres qui manquent dans l'*Essai*, et qu'il n'a donnés que dans une sorte de troisième partie de cet ouvrage, publiée postérieurement, nous y retrouvons aussi d'autres nombres du même auteur pour la Pendule à secondes et à sonnerie de notre planche XVIII. Au défaut de ces derniers, qui manquent aussi en partie dans l'*Essai*, nous avions proposé ceux de la Pendule moderne, pl. III, qui peuvent en effet s'y adapter aisément. Mais, pour que la comparaison puisse en être faite par nos lecteurs, nous insérons ici, par la même occasion, les nombres suppléés par *Berthoud*, pour cette même Pendule à secondes sans équation; ils diffèrent principalement pour la sonnerie, dont la roue de compte ne fait dans ce dernier calcul qu'une révolution en 24 heures, tandis que, dans les pièces ordinaires, on lui donne deux révolutions pour chaque jour.

Autres dimensions et nombres d'un régulateur à secondes et à poids, de Berthoud, avec sonnerie à ressort.

787. La Pendule à secondes, pl. XVIII, est une des premières de *Berthoud*, et nous avons prévenu qu'elle n'était reproduite que comme un moyen économique de former un régulateur avec un de ces anciens mouvements à sonnerie que l'on rencontre assez souvent d'occasion dans le commerce; et que c'est aussi un exemple de la disposition générale des anciens mouvements français du genre de ceux qu'on trouve dans *Thiout*. Nous y ajoutons ici une variation de nombres, pour la direction des changements qu'on peut toujours faire à ces anciens mouvements pour les transformer en régulateurs ordinaires. Quant aux régulateurs modernes perfectionnés, on en trouvera le modèle dans les chapitres qui traiteront des *Horloges astronomiques*, où toutes les recherches de précision seront développées. Il ne s'agit ici que des régulateurs les plus ordinaires, qui suffisent dans bien des cas, et que l'on peut aussi établir entièrement à neuf à peu de frais sur le plan ci-après, avec ou sans sonnerie.

788. La roue A de cylindre et du poids engrène de suite avec la *grande moyenne*, et porte, dans le 2ᵉ plan de *Berthoud*, 31 lignes de diamètre, une ligne et demie d'épaisseur et 90 dents (l'auteur ne lui en avait donné dans l'*Essai* que 84). Elle engrène dans le pignon de 14 ailes (primitivement de 12 ailes) de *grande moyenne;* celle-ci, marquée B, a 22 lig. et demie de diamètre, 0 lig. 10/12 d'épaisseur et 90 dents (ancien. 80), et engrène dans le pignon *b* de 10 ailes. Pour la roue C, diam., 20 lig.; épaisseur, 0 lig. et demie et 80 dents; elle engrène dans le pignon *c* de petite moyenne, lequel a 10 ailes, et sa roue D du même axe a 75 dents, son diamètre 18 lig. 1/3, et son épaisseur 0 lig. 5/12; cette roue D engrène dans le pignon de secondes de 10 ailes.

789. La roue E d'échappement ou de secondes a 16 lig. 3/4 de diamètre, 0 lig. 5/12 d'épaisseur et 30 dents; elle fait un tour par minute. L'axe de cette roue, placée au milieu

de la largeur de la platine se trouve à 3 pouces 2 lignes au-dessus du bord inférieur de cette même platine. L'auteur suppose ici aux platines carrées 6 pouces 4 lignes de largeur sur 6 pouces de hauteur. Cette mesure ne s'accorde point avec les dimensions de la planche XI ni avec la planche II de l'*Essai*. (Cette planche II, mal gravée, est celle que nous avons fait copier dans notre planche XVIII, qui n'est pas beaucoup mieux); mais la différence est peu importante, soit que l'on fasse un régulateur avec un ancien mouvement, soit que l'on veuille exécuter la pièce à équation que nous venons de décrire, et dont la platine a dans l'*Essai* environ 7 pouces 1/4 de haut, sur une largeur indéterminée, vu qu'elle est coupée par les filets de la planche. Mais, en cas d'exécution d'une pièce à équation, on conçoit qu'il faut toujours tracer exprès un plan subordonné à la disposition et grandeur du cadran, ce qui est facile, en conservant d'ailleurs les situations et grandeurs des mobiles.

790. Le centre de l'ancre d'échappement est placé sur la ligne verticale de H du milieu de la platine, pl. XVIII. Ce centre peut être distant de celui de la roue d'échappement, suivant *Berthoud*, d'un diamètre et demi de cette roue, ou de trois fois le rayon, qui est ici de 8 lig. 3/8; la distance entre les deux centres de la roue et de l'ancre est donc 25 lig. 5/8, pour faire décrire les arcs entiers d'un degré; mais il ajoute ensuite que, préférant depuis des arcs de deux degrés, il ne place le centre de l'arc qu'à 21 lig. environ au-dessus de celui de sa roue. On le placerait encore plus bas actuellement que l'on donne au pendule des arcs de 3° à 4°.

Dimensions et nombres du rouage de la sonnerie de la planche XVIII.

791. On vient de voir que les dernières dimensions données par *Berthoud* pour le mouvement de cette pièce sont un peu plus fortes que les premières, et, par suite, que celles de notre planche XVIII; il en est de même pour la sonnerie. Suivant les dernières mesures données par cet auteur, la roue T du barillet de sonnerie a 35 lignes de diamètre, 2 lignes d'épaisseur et 84 dents; elle engrène dans un pignon de 14 ailes (indiqué sous le n° 13 de la figure), sur lequel pignon est rivée la première grande roue V, dont le pivot, prolongé au dehors de la seconde platine, porte le *chaperon* ou roue de compte *Que Que*.

La roue V a 24 lignes de diamètre, 1 ligne d'épaisseur et 90 dents; elle engrène dans le pignon de 8 (n° 14) de la roue de chevilles X.

La roue de chevilles X a 18 lig. de diamètre, 0 lig. 9/12 d'épaisseur et 84 dents; elle porte 16 chevilles pour faire frapper au marteau les heures et les demies; cette roue engrène dans le pignon de 8 (n° 15) de la roue d'arrêt Y.

La roue d'arrêt Y a 15 lignes de diamètre; son épaisseur est 0 lig. 6/12 (ou demi-ligne); elle a 72 dents; cette roue porte deux chevilles diamétralement opposées pour arrêter la sonnerie lorsque les heures sont frappées. L'arrêt a lieu sur la détente *f, t, e*. La roue Y engrène dans le pignon de 6 (n° 16) de la roue de volant Z.

La roue de volant Z a 14 lignes de diamètre, son épaisseur est d'une demi-ligne; elle a 66 dents et engrène avec le pignon de 6 *u* du volant

792. Pendant que la roue de compte *Que Que* fait un tour, la roue de chevilles X en fait onze et 2/8, puisque le nombre 8 des ailes du pignon de cette roue est contenu onze fois et 2/8 dans le nombre 90 des dents de la première grande roue V qui porte la roue de compte. Or, la roue X porte 16 chevilles, qui, multipliées par onze et 2/8 ou 1/4, donnent 180 coups, nombre des heures et des demies en 24 heures, et que doit frapper le marteau pendant la révolution de la roue de compte; d'où il suit que celle-ci ne fait qu'un tour en 24 heures (contre l'usage ordinaire conservé depuis cette époque). Il faut donc que la roue de compte soit taillée sur le nombre 180 de l'outil à fendre : elle contiendra ainsi deux fois l'une après l'autre la série d'entailles des roues de compte ordinaires, c'est-à-dire que la série de suite, 1 heure, 2 heures, 3 heures, etc., jusqu'à 12 et leurs demies, occupera une moitié de la circonférence; et que l'autre moitié aura une seconde série semblable des heures 1, 2, 3, etc., jusqu'à 12.

793. Nous terminerons ce supplément à l'équation ci-dessus de *Berthoud*, de notre planche XXI, et à son régulateur plus simple de notre planche XVIII, par la définition du mot *équation*, si connue de la plupart des lecteurs, que nous l'avions regardée comme superflue au début de ces articles; mais, comme elle peut avoir de l'intérêt pour quelques autres personnes, nous l'accompagnerons ici des notions générales sur les causes physiques et astronomiques qui ont rendu ce mécanisme utile. Nous passerons de là à l'*équation* moins commune des Montres portatives.

794. *Équation*, provenant du mot latin *æquatio*, de *æquare*, égaler, exprime proprement l'action de rendre égales deux quantités qui, avant, ne l'étaient pas; il se dit aussi, par extension, de la quantité même à soustraire ou à ajouter à l'une des quantités inégales comparées, pour la rendre égale à l'autre. En algèbre, c'est l'expression d'une quantité présentée sous deux dénominations différentes; alors, mettre des quantités en *équation*, c'est représenter par une double expression des quantités réellement égales et identiques. En Horlogerie, on donne le nom d'*équation* au mécanisme particulier qui indique la différence entre les périodes diurnes des deux temps, distingués par les noms de *moyen* et de *vrai* ou *solaire*.

795. On sait que le *temps moyen*, égal et uniforme, est celui que marquerait un *chronomètre* marchant avec une régularité parfaite, et divisant l'année en jours exactement égaux, les jours en 24 heures égales, ainsi que les minutes, secondes, etc. Tel est le but des ouvrages d'Horlogerie; ils approchent plus ou moins de l'atteindre, suivant leur degré de perfection.

796. Le *temps vrai* ou *solaire* est celui du retour diurne d'un même méridien terrestre sur le centre du soleil, retour indiqué par des gnomons, de grandes méridiennes, ou par des instruments astronomiques très-soignés, etc.

797. Ces retours du méridien divisent l'année en jours inégaux, dont les principales variations sont périodiques, c'est-à-dire reviennent à très-peu près les mêmes aux époques semblables de chaque année. Ces inégalités, dont les causes connues sont calculées, servent à on conclure le temps moyen ou égal; c'est à cet usage que sont destinées les tables annuelles du *temps moyen au midi vrai*, publiées dans l'*Annuaire*

pour tous les jours de chaque année. Ces tables diffèrent un peu d'une année à l'autre pendant quatre ans, après quoi les quantités d'équation reviennent sensiblement les mêmes.

. 798. Les variations du temps *solaire* sont expliquées astronomiquement par plusieurs effets combinés des révolutions et directions de divers corps célestes de notre système (ou ordre) planétaire, tels que : l'ellipticité de l'orbite annuelle parcourue par l'axe de la terre, autour du soleil qui occupe l'un des deux centres ou foyers de cette espèce d'ovale : la vitesse différente de translation de l'axe de la terre dans les diverses saisons, occasionnées elles-mêmes par la situation constamment parallèle de l'axe terrestre, incliné de 23° 1/2′ sur l'*écliptique* qu'il parcourt dans son orbite. A ces causes principales, il s'en joint encore quelques autres astronomiques et physiques moins influentes ; mais la longue explication des unes et des autres ne pourrait trouver place dans cette courte notice.

799. Quant à la rotation diurne du globe terrestre sur son axe en 24 heures, à l'égard du soleil *fixe*, et laquelle seule produit la succession des jours et des nuits, le coucher, le lever apparents des astres, etc., mouvement indépendant de la translation du globe dans son orbite annuelle, cette révolution diurne, disons-nous, s'effectue dans des intervalles sensiblement égaux, lorsqu'on la mesure sur les étoiles, dont la distance à la terre surpasse si prodigieusement celle du soleil, que le diamètre entier de l'orbite annuelle terrestre de 68 millions de lieues, terme moyen, étant pris pour base d'un triangle très-aigu, ne peut ouvrir sur une étoile comme sommet, un angle d'une seconde de degré ; il s'ensuit que les inégalités de translation de la terre deviennent nécessairement insensibles sur les étoiles ; il n'en est pas de même de la rotation diurne de la terre à l'égard du soleil, vu l'inégalité de translation sensible alors de la terre, et les autres causes dont nous ne devons pas poursuivre ici les détails astronomiques.

800. Les étoiles sont considérées, en astronomie, comme autant de soleils à peu près fixes dans l'espace, quant aux observations faites au milieu de notre système, et l'analogie porte à penser que ces soleils sont aussi les centres d'autres systèmes (dispositions) plus ou moins approchants du nôtre. Si la rotation diurne de la terre n'était pas sensiblement régulière, le temps des retours d'un même méridien terrestre sur une étoile en serait très-visiblement affecté ; mais ces retours ne présentant aucune inégalité sensible, en tenant compte toutefois de quelques mouvements des étoiles apparents, mais connus, nous offrent une troisième espèce de *temps*, qu'on appelle *sidéral*, un peu plus rapide que les temps *solaire* et *moyen*. Le *temps sidéral* avance, en effet, chaque jour sur le *temps moyen* de 3′ 54″, 9, à une très-petite fraction près, ce qui permet de connaître plus directement et avec une exactitude plus que suffisante la marche des régulateurs et chronomètres (ou garde-temps), par des moyens que nous indiquerons en leur lieu : car si la marche du régulateur, comparée à une étoile, retarde exactement et constamment chaque jour de la quantité énoncée ci-dessus, il en résulte qu'elle suit parfaitement le temps moyen. Nous bornerons ici cette digression sur un sujet qui sera plus développé dans les notions d'astronomie physique,

annoncées comme propres à éclairer sur les moyens de réglage des instruments q'une haute précision.

MONTRE SIMPLE A ÉQUATION PAR UN CADRAN MOBILE ET A SECONDES CONCENTRIQUES, MARQUANT LES MOIS ET LEURS QUANTIÈMES, PAR F. BERTHOUD.

801. NOTA. Nous remplaçons dans notre planche XXI, par un cadran d'équation moderne en Montre dont il sera question un peu plus loin, l'ancien cadran de *Berthoud* chargé de gros chiffres et d'aiguilles massives, dont la confusion est peu propre à servir de modèle. Il suffira de prévenir ici que l'aiguille de minutes y a deux branches, comme celle des secondes pour son équilibre, et que, tandis que la branche la plus longue marque à l'ordinaire les minutes du temps moyen, l'autre branche porte une figure très-volumineuse du soleil, dont un des rayons prolongé et diamétralement opposé à la branche du temps moyen marque les minutes du temps vrai ou solaire sur le petit cadran mobile, ajusté au centre ouvert et à fleur d'un grand limbe émaillé et ordinaire, comme dans la figure 2 de notre planche XX. Il s'ensuit que le point de 60′ du petit cadran se trouve sur 6 heures au lieu d'être sûr midi, lorsque l'équation est zéro, vu que c'est la pointe de l'arrière de l'aiguille qui marque l'équation, comme pour régler l'instant de la détente sur certains petits cadrans d'anciens réveils.

802. Le cercle du grand limbe émaillé est ici percé entre une heure et deux heures d'une ouverture assez oblongue pour y apercevoir 20 à 22 divisions gravées et numérotées de 5 en 5 sur la roue annuelle, avec le nom du mois au-dessous. Un index peint au milieu des deux heures citées indique la division de chaque jour. Nous allons, du reste, laisser parler ici l'auteur lui-même.

« L'aiguille des secondes passe ici au-dessus des deux autres aiguilles, comme dans les Pendules. Pour remettre l'équation à son jour quand la Montre a été arrêtée, l'étoile E, fig. 4, a un de ses rayons toujours saillant en dehors de la fausse plaque, ce qui donne le moyen de faire tourner l'étoile, et par elle la roue annuelle.

« La Montre se remonte par le dessous; ce qui m'a fait appliquer au fond de la boîte un cercle du quantième, construit comme ceux dont parle M. Thiout, *Traité d'Horlogerie*, tome II, page 307.

« La figure 5 représente l'intérieur de la fausse plaque dont le dehors porte les cadrans : c'est dans cette plaque que sont ajustées les pièces qui forment l'équation et donnent les variations du soleil. A est la roue annuelle de 146 dents, fendue à rochet et mise immédiatement sous la fausse plaque, dont le fond porte un canon sur lequel tourne la roue appuyée sur le fond. L'ellipse B est attachée sur la roue annuelle; elle fait mouvoir le râteau HF qui engrène dans le pignon C; celui-ci est porté par un canon qui passe dans l'intérieur de celui de la fausse plaque. Sur le canon de C est attaché en dehors le petit cadran mobile de temps vrai. Ainsi, on voit qu'en faisant mouvoir la roue annuelle ce cadran doit nécessairement avancer ou rétrograder, suivant les différents rayons de l'ellipse, et produire les variations du soleil. Voici le moyen dont je me sers pour faire mouvoir la roue annuelle.

« Le garde-chaîne de la Montre est fixé sur une tige dont les pivots se meuvent dans les deux platines, et peut décrire un petit arc de cercle. Un des pivots porte un carré sur lequel est ajusté dans la cadrature le levier AC à pied-de-biche, fig. 6, pl. XXII, dont l'extrémité s'engage dans l'étoile E, qui est à cinq rayons, et fait ainsi passer un de ces rayons toutes les fois que le crochet de la fusée pousse le garde-chaîne. Le bras CD du garde-chaîne, fig. 6, méplat, élastique et flexible en hauteur, est soulevé par la chaîne jusqu'à la hauteur du crochet D de fusée qui lui donne, ainsi qu'au pied-de-biche, le petit mouvement circulaire qui pousse un rayon de l'étoile. Celle-ci est assujettie par un sautoir D, qui lui permet de faire la cinquième partie d'un tour et l'empêche de revenir à sens contraire lorsque le pied de biche se dégage.

« L'axe de l'étoile porte deux palettes opposées, comme on le voit en E, fig. 6, et qui servent à conduire la roue annuelle, en sorte que deux dents de cette roue passent nécessairement en 5 jours, et que sa révolution est de 365 jours.

« Un ressort de sautoir KL est attaché à la paroi intérieure de la fausse plaque et maintient la roue annuelle.

« On peut donner à la roue annuelle un mouvement continu, en remplaçant le garde-chaîne mobile par une roue fixée à l'étoile et engrenant avec une roue de mouvement qui produise un tour en cinq jours.

« Le ressort G, fig. 5, presse contre l'ellipse une cheville F du râteau H. Le ressort B ramène le pied-de-biche AC à mesure que le crochet de fusée rétrograde. »

803. Cette description de *Berthoud* et l'une des premières de son *Essai*, qui était son début dans ce genre, présente plusieurs obscurités et une légère contradiction : 1° L'auteur n'a dû diviser les mois que de 5 en 5 jours, à raison de l'exiguïté de l'espace; et dans sa figure la partie de roue annuelle vue par l'ouverture du cadran présente les mois divisés en 30 jours, ce qui n'est ni praticable ni d'accord avec la division de la roue annuelle qui avance d'une dent en deux jours et demie. Cette erreur est néanmoins réparée en partie dans l'*Histoire de la mesure du temps*, où cette même cadrature est rapportée. 2° Il déclare, au commencement de l'article, avoir appliqué une construction antérieure de *Thiout* pour produire à part un quantième du mois, et n'entre dans aucun détail à ce sujet. (La disposition de *Thiout* consiste à faire marcher un cercle de quantième monté sur le fond de la boîte, au moyen d'un levier servant à déboucher tous les jours le trou de remontoir pratiqué à l'arrière de la boîte pour le remontage; mais *Thiout* n'explique pas plus que *Berthoud* où apparaissent ses divisions et chiffres de quantième.) Ainsi, outre l'insuffisance des détails, *Berthoud* tombe ici dans une des moindres contradictions, il est vrai, que plusieurs artistes lui ont reprochées; mais elle nous oblige de laisser aux lecteurs capables le soin de tirer parti de l'idée principale et de suppléer au reste de l'explication.

804. Notre auteur donne un peu plus loin, pour une Montre à répétition, une *équation* dont les dispositions sont à peu près les mêmes, sauf que sa roue annuelle marche continuellement par une série d'engrenages menée par le mobile de la fusée; cette menée est proposée de deux manières. Dans l'une, la roue de fusée porte un canon d'acier

qui frotte seul dans le trou de grande platine, où il sert de pivot, en le dépassant assez pour porter sous le cadran un pignon premier moteur du rouage d'équation. La tige de fusée roule dans ce canon d'acier pendant le remontage, en sorte que la rétrogradation de la fusée n'agit point sur le rouage d'équation, puisque celui-ci n'est mené que par la roue de fusée qui marche toujours dans le même sens. Dans l'autre construction, c'est l'arbre même de fusée qui porte un doigt moteur du rouage d'équation; ce doigt agit sur une étoile à dents très-inclinées et à sautoir, et fait sauter ces dents pendant le remontage; mais, lorsque la fusée rétrograde, la même inclinaison des dents de l'étoile permet au doigt de passer sans faire sauter les dents, en les poussant, moins avant, vu leur inclinaison plus grande qui se présente alors au doigt, en sorte que les mouvements de l'étoile n'arrivent pas à passer l'angle du sautoir, et que l'étoile par ce moyen, ne recule pas, malgré la rétrogradation du doigt de fusée, n'étant en quelque sorte émue qu'un instant, et retournant à la même place sans avoir sauté, tandis que le passage du doigt dans le sens contraire la fait toujours sauter et avancer dans le sens voulu.

805. La répétition dont parle ici *Berthoud* est un mouvement à 8 jours; il propose après la même équation pour un mouvement d'un mois. Il désapprouve par la suite ces longues marches dans une Montre; mais on voit qu'il avait été entraîné d'abord par les excès en vogue à une époque où *Romilly* et quelques autres proposaient, comme perfectionnement, des Montres marchant six mois et même un an sans remonter, et à vibrations lentes. Ces extravagances, qui ne pouvaient avoir de succès soutenu, sont abandonnées depuis longtemps. Enfin, *Berthoud* se bornant dans une autre construction à placer son équation sur un mouvement ordinaire marchant 30 heures, s'exprime comme il suit : « On ajoutera, dit-il, à frottement sur le canon d'acier de la « roue de fusée, un pignon de 8 ailes, mais le plus petit possible; il mènera une roue « de 32 dents; or, comme la fusée fait un tour en 6 heures, la roue de 32 fera sa ré- « volution en 24 heures : on fixera sur cette roue un pignon de 4 menant une roue « de 40, qui tournera en 10 jours; celle-ci portera encore un pignon de 4 qui mènera « la roue annuelle de 146. Le deuxième pignon de 4 sera à frottement sur la roue « de 40, et portera une étoile en rochet comme ci-dessus, dont les pointes dépasseront « la bâte, pour remettre l'équation au quantième lorsqu'on aura laissé arrêter la « Montre. »

806. En voilà plus peut-être qu'il n'importe d'en savoir sur les anciennes Montres à équation et à cadran mobile; cette instruction néanmoins peut devenir utile dans l'occasion. Nous allons passer à la Montre moderne de ce genre, c'est-à-dire à celle d'une certaine époque encore récente, plus heureusement disposée, quant à la distribution des aiguilles et des divisions moins compliquées que celles de ces cadrans percés; enfin qui n'exigent point, comme on va le voir, de petit cadran mobile toujours difficile à ajuster proprement. Cependant il ne faut pas non plus dédaigner ces premières productions, qui ont beaucoup de mérite pour leur temps, étant surtout aussi bien exécutées que celles de *Berthoud*, comme sa répétition à cadran de 18 lignes, à secondes concentriques,

et avec un bon échappement à cylindre. De telles pièces de *Berthoud*, bien conservées, seraient encore précieuses aujourd'hui, malgré leur hauteur et leur forme un peu ronde ; elles seraient bien préférables aux platitudes du jour. Un agrandissage pourrait souvent améliorer la figure de la boîte, en conservant à l'intérieur une solidité que n'ont pas la plupart des pièces actuelles, qui appartiennent plus à la bijouterie qu'à la bonne et véritable Horlogerie.

CADRATURE ET CADRAN MODERNE D'ÉQUATION.

807. Le cadran amplifié de la figure 7, pl. XXI, est celui d'une Montre tout à fait moderne, avec équation et quantième annuel, dont la cadrature permet la disposition d'aiguilles la moins confuse. Elle est d'un usage aussi commode au moins que l'ancienne. C'est ce que nous connaissons de mieux en Montre et de plus simple. Les aiguilles d'heures, minutes et secondes, concentriques, sont à baguettes à l'ordinaire. L'aiguille d'équation, beaucoup plus délicate et très-aplatie, affleure le cadran et prend son centre de mouvement à gauche, vers le dixième chiffre des heures; sa pointe parcourt un arc de cercle porté vers le centre des autres aiguilles, et divisé en 32 minutes chiffrées légèrement de deux en deux, avec des points intermédiaires. Le zéro occupe le milieu des divisions, et l'aiguille le désigne lorsque l'équation est nulle. C'est de ce point que les nombres des minutes vont en augmentant vers le haut, et accompagnées du signe + (*plus*), lorsque le temps solaire est en avance, et vers le bas avec le signe — (*moins*), lorsque ce temps est en retard sur le temps moyen marqué par les aiguilles ordinaires.

L'axe de l'aiguille d'équation porte sous le cadran un bras ou *touche* dirigée vers le centre, à peu près au-dessous du mot *équation*, et qui, poussée par un ressort doux, repose sur une *ellipse* que porte une roue annuelle, conduite à l'ordinaire, soit par d'autres roues de cadrature, soit par un doigt qui l'atteint une seule fois et la fait avancer d'une dent pour 24 heures. Un cliquet à ressort maintient la roue annuelle fixe pendant le reste du temps.

808. Cette équation est simplement annuelle : on la peut faire aussi bissextile; mais la différence, si peu sensible dans cette dimension, ne nécessite guère un tel travail, aussi délicat et compliqué qu'il est à peu près inutile.

809. Le quantième du mois est indiqué à droite par une aiguille semblable à celle d'équation, et dont le centre est vers 2 heures; sa pointe parcourt de même un arc de cercle divisé en 31 jours, moyennant 15 chiffres légers et leurs points intermédiaires, accompagnés du mot *quantième*, en sorte que les deux divisions et leurs aiguilles présentent une disposition symétrique. L'axe de l'aiguille de quantième porte sous le cadran un râteau denté en rochet, de même ouverture que l'arc du cadran; celui-ci laissant une moitié de sa propre étendue entre ses extrémités et les bords du cadran, il reste dans la cadrature l'espace nécessaire au développement du râteau. Ce dernier est remonté chaque jour de la valeur d'une division du cadran par un doigt de l'un des mobiles tournant en

24 heures, en armant d'autant un ressort long et doux, qui presse sur une goupille très-voisine du centre du râteau. Une dent de celui-ci est retenue à chaque progression diurne par un cliquet à queue; ce cliquet est dégagé à la fin du mois par une bascule de cadrature mise en action par la roue annuelle. Le râteau recule alors subitement de sa progression totale, et l'aiguille se retrouve au 1er du mois pour recommencer ses progressions partielles et diurnes.

810. Pour cet effet, la roue annuelle, divisée en 12 rayons, porte à son limbe autant de chevilles, mais inégalement espacées, pour dégager le râteau deux jours plus tôt à la fin de février, un seul jour plus tôt pour les mois de 30 jours, en enfin un jour plus tard qu'à ceux-ci pour les mois de 31. Mais tous les 4 ans, dans l'année bissextile, l'aiguille étant en avance d'un jour au 1er avril, on la recule facilement d'une division, en poussant en arrière avec la clef, vu que le canon du centre est à frottement suffisamment dur sur son axe pour ne pas se déplacer par les secousses, mais capable de céder néanmoins à l'action plus forte de la clef, lorsque l'encliquetage solide retient le râteau; on la remet ensuite à sa première place à la fin du dernier mois de l'année bissextile.

811. Nous donnerons dans la suite de cet ouvrage le calibre entier de cette cadrature, lorsque nous décrirons les Montres modernes perfectionnées, avec quantièmes et autres effets; nous nous bornons ici à l'indication des dispositions simples dont il s'agit pour l'équation et un quantième annuel; mais, après ce que l'on a vu précédemment des divers mécanismes de ce genre, tout artiste un peu exercé peut se faire aisément une juste idée de celui-ci, et pourrait en créer lui-même le calibre sur la seule disposition du cadran. La planche que nous donnerons plus tard suppléera à quelques détails de forme, de dégagements, et autres moyens de précautions que l'on peut déjà prévoir d'avance; le bras d'équation peut, par exemple, agir par engrenage sur un pignon de l'axe de son aiguille, la bascule a un *pied-de-biche*, etc.

812. Plusieurs compositions de ce genre de feu *Bréguet*, entre les mains d'amateurs distingués, d'autres copiées en Suisse et sur plusieurs autres points de l'Europe, sont connues de plusieurs artistes et se trouvent dans le domaine public. Les meilleures Montres de ce genre, de feu *Bréguet*, réunissent à l'agrément de la forme, l'excellence du travail et d'un service solide et constant. Leur dimension extérieure est ordinairement une de celles dont nous avons donné le profil et le diamètre dans nos planches XV et XIX, ou quelque autre proportion intermédiaire. Leur cadran est plat. Le cristal est de la forme de ceux qu'on nomme *chevés*, c'est-à-dire d'une figure presque plate du centre, ou du moins très-légèrement bombée dans cette partie, pour lui laisser quelque soutien, et plus courbe vers les bords, en approchant de la lunette. Le fond de la boîte imite symétriquement la forme du cristal. Feu *Bréguet* avait un tact heureux pour la distribution gracieuse à l'œil des parties d'une composition mécanique, et, ici, la hauteur de ses axes était d'accord avec le principe; il a introduit le premier la forme de ces cristaux *chevés* qui, dans l'origine, étaient pris dans un morceau épais de glace, creusé sur le tour, arrondi régulièrement et poli avec soin; ces

cristaux étaient fort chers. Le même auteur imagina depuis de simplifier ce travail par le moulage au feu, suivi d'un poli facile, ce qui en a réduit considérablement la main-d'œuvre. Mais ceux-ci, presque toujours trop minces aujourd'hui, parce qu'ils sont destinés aux *platitudes* à la mode, sont beaucoup moins solides que les premiers. Enfin, nous ne pouvons trop répéter que les Montres du meilleur temps de feu *Bréguet* étaient larges, c'est-à-dire d'un assez grand diamètre qui permettait une bonne épaiseur moyenne, sans que la figure en fût moins agréable; elles paraissaient même plates et peu épaisses, en comparaison des autres formes antérieures avec leurs cadrans et verres bombés, et leurs boîtes en *oignon*. L'épaisseur conservée réellement à ces fortes Montres est insensible, à raison de leur grand diamètre, non-seulement dans la poche, mais même dans le gousset, et malgre l'usage de vêtements serrés; il en résulte, pour les mobiles du mouvement, une suffisante hauteur de tige, expressément recommandée pour la liberté et la réduction du frottement des pivots, comme on ne manque pas de le pratiquer dans les pièces marines et *garde-temps*, pour leur perfection sous ce rapport; les jours entre les mobiles et la juste épaisseur de ceux-ci, la hauteur avantageuse de la lame du ressort moteur, etc., y ont tout l'espace requis pour la sûreté et la plus constante durée des effets.

Les Montres de feu *Bréguet* ont toujours été d'un haut prix, accessible seulement à l'opulence, inconvénient que l'on doit regretter en partie; mais ceux qui étaient en état d'en faire le sacrifice y trouvaient les qualités essentielles, réunies à l'agrément, et ces ouvrages de choix n'étaient pas alors trop chers pour eux.

813. Dans quelques pièces de ce genre, l'axe de la roue annuelle traverse le cadran pour porter une petite aiguille qui indique les initiales des noms des mois sur une division ou cadran circulaire peint dans le vide intérieur de l'arc d'équation; mais ce petit cadran nuit un peu à la simplicité et netteté de l'ensemble. Dans d'autres pièces, la grande aiguille concentrique des secondes est remplacée par une aiguille *trotteuse* de moindre dimension, battant les cinquièmes de seconde sur un petit cadran à part, peint dans le bas, entre 6 heures et le centre du grand cadran. Celui des secondes est souvent renfoncé dans les Montres ordinaires, et même rapporté et collé sous le grand cadran, pour que son aiguille puisse éviter plus sûrement la rencontre de celle des heures; mais, dans le cadran de Montre moderne à équation de la planche XXI, fig. 7, amplifié comme il a été dit, mais plus ou moins réductible, ce renfoncement n'est pas nécessaire, attendu que les aiguilles d'heures et minutes, devant passer au-dessus de celles d'équation et de quantièmes sans y toucher, sont alors assez élevées pour ne pas toucher non plus à l'aiguille des petites secondes. Enfin, la disposition que nous venons d'indiquer pour l'équation et le quantième annuels a tellement prévalu, que l'on n'a plus besoin de revenir à l'ancienne construction de *Berthoud* et autres, surchargée de lourdes aiguilles, et de deux cadrans, dont le petit est mobile au milieu du grand, coupé en conséquence, comme on l'a vu; ce qui, indépendamment d'une exécution trop difficile pour être faite proprement, est désagréable à la vue et sujet à laisser pénétrer la poussière dans la cadrature.

814. La dernière disposition dont il s'agit ici a été pratiquée dans quelques Pendules de voyage ou Montres de voiture à boîte carrée et à glaces, dont les mobiles approchent de la dimension de ceux d'une forte Montre. Ces pièces portent quelquefois une série de quantièmes, qui les a fait appeler *pièce-almanach*. On ne voit pas pourquoi on n'adapterait pas le mécanisme moderne d'équation aux Pendules d'appartement, où, en place de l'aiguille du temps vrai, qui peut tromper le premier coup d'œil, les arcs ci-dessus d'équation et de quantième contrasteraient assez heureusement avec les cercles entiers du cadran. *Sans pet. sec. les j. de sem. seraient en s.*

815. Du reste, si l'on ajoute avec raison l'équation du *temps solaire* aux Pendules, pour avoir, par le même moyen, le quantième annuel assez utile, on l'exécute rarement aujourd'hui en Montre de poche, tant pour éviter un travail minutieux et exigeant qui en augmente beaucoup le prix, qu'à cause de l'usage public actuel du *temps moyen, suggéré par l'auteur de cet ouvrage et adopté par un accident bizarre.*

816. On a fait aussi des machines à part pour produire l'équation ; on les conduit à la main ; mais elles exigent un travail soigné, assez dispendieux, et ont été peu accueillies. En fait d'indications astronomiques, plusieurs artistes pensent comme le père d'*Antide Janvier*, qui disait à son fils qu'un almanach de *deux sols* était plus sûr et plus économique que toutes les pièces d'Horlogerie à mouvements ou indications célestes qui, après bien des calculs, des travaux et des soins, enrichissent rarement et plus souvent ruinent leurs auteurs.

817. Nous terminerons ici ce qui concerne l'*équation* dans les Pendules et les Montres, dont les articles précédents doivent avoir préparé suffisamment l'intelligence générale. Nous ne pouvons pas citer toutes les différentes constructions des nombreux auteurs qui s'en sont occupés ; tels que *Sully*, *Lebon*, Julien, le *P. Alexandre*, *Thiout*, *Rivaz*, *Enderlin*, etc., etc. ; la moins sûre dans ses effets était celle du *P. Alexandre*, plus calculateur qu'il n'était artiste, et qui n'avait pas assez scrupuleusement examiné les moyens d'exécution ; on a vu (763) la difficulté d'y remédier.

818. La méthode du *Traité général des Horloges* était de leur faire suivre uniquement le temps *solaire*, vrai, mais inégal, en faisant varier continuellement la longueur du pendule, suivant la proportion nécessaire, comme il a été dit. En expliquant cette méthode, nous avons été d'accord avec *Berthoud*, qui remarque à ce sujet que, dans la courbe, la moindre erreur répétée 86,400 fois (nombre des oscillations par jour du pendule à sec) deviendrait trop sensible ; qu'il en faudrait tâtonner la correction pendant plus d'une année ; qu'avec des ressorts de suspension, pris sur différents points, leur élasticité variable serait rarement proportionnelle au changement de longueur du pendule, outre la flexion du levier, l'affaissement des points d'appui, etc. Ce moyen, appliqué d'abord à l'Horloge de l'hôtel de ville de Paris, a été depuis supprimé.

819. On conçoit donc qu'il ne suffit pas de trouver des idées neuves, en Horlogerie, et qu'il faut encore que les moyens d'application soient faciles, simples, directs, géométriques, et que les résultats comportent l'exactitude et la sûreté exigées par le sujet.

CHAPITRE II.

ÉLÉMENTS GÉNÉRAUX DE MÉCANIQUE,

A L'USAGE DES ATELIERS D'HORLOGERIE (1).

ET PREMIERS PRINCIPES POUR LA COMPOSITION DE TOUTES LES MACHINES.

Nota. Ces premières notions seront suivies immédiatement des améliorations modernes, de la méthode des engrenages et des principes des échappements qu'elles devaient nécessairement précéder.

820. La mécanique est cette partie des sciences physico-mathématiques qui concerne le mouvement dans les machines, les forces motrices, leur direction, leurs lois et leurs effets. L'étude de la mécanique nous enseigne à employer pour notre usage les puissances observées dnas les corps, et à produire, en imitant la nature, ce que notre ignorance appelle d'abord des phénomènes, jusqu'à ce que l'examen approfondi des effets et des relations nous ait mis à même d'en découvrir les causes prochaines et naturelles ; ces obser-

(1) Au début du 2e volume de son *Essai*, Berthoud réduit à une seule page, en assez gros caractères, ce qui concerne le levier et la mécanique, et la résume finalement comme il suit : « Si deux « masses P et *p*, attachées aux extrémités d'une verge inflexible AB, sont telles que la masse P con- « tienne autant de fois la masse *p* que le bras de levier HB contient le bras AH, il y aura équilibre. » Quant aux leviers, coudés, angulaires, à la quantité, direction et composition des forces, au mouvement propre ou acquis, uniforme, accéléré, retardé, etc., etc., il n'y en est nullement question. C'est pourtant faute de ces études de détail que tant de gens, même distingués, ont entrepris des compositions dispendieuses et sans succès. Si on laisse tout à deviner à l'intelligence naturelle de l'élève, c'est le moyen de le retenir longtemps dans l'enfance de l'art, et c'est encore là de la *renaissance* et non du *progrès ;* mais si les livres d'Horlogerie ne peuvent pas être des traités complets de physique, de mathématiques, etc., ils doivent du moins en offrir assez de principes appliqués pour indiquer les secours et l'utilité de la science, et stimuler l'étude des ouvrages spéciaux. (V. notre pl. XXII, fig. 12, pour le passage ci-dessus.) MM. les amateurs peuvent consulter avec fruit les ouvrages de M. *Morin*, professeur de mécanique pratique au Conservatoire des arts et métiers de Paris.

Sans les notions indispensables que nous donnons ici, on est incapable d'apprécier complétement la plupart des perfectionnements de l'Horlogerie, que nous allons bientôt décrire, les principes des engrenages dont la méthode paraîtra à la suite, les effets précis et calculés des divers échappements, etc. C'est pourquoi nous devons les faire précéder par ces premières notions de mécanique.

L'ignorance présomptueuse pourrait seule croire que cette suite des premières notions de physique générale n'est pas de l'*Horlogerie*, et alors une planche de leviers, des balances, etc., ne lui sembleraient même pas être de la *mécanique*, quoiqu'ils en soient pourtant la première base. Mais cet ouvrage est annoncé comme suppléant à cet égard les auteurs précédents, et, du reste, il n'appartient point à l'ignorance de dicter la manière de l'instruire. Il est permis à qui voudra de passer les articles hors de sa portée, que d'autres, plus conséquents, s'estimeront heureux de trouver ici dégagés des principales difficultés de la science. Plusieurs sentiront plus tard le besoin d'y revenir. *F. Berthoud*

vations ont lieu dans la mécanique, soit que les corps qu'elle emploie se tiennent entre eux dans un état d'équilibre, soit que quelques-uns se trouvent mus par la puissance prépondérante des autres, en raison de leurs positions relatives ou de l'intensité différente de leurs propriétés physiques et communes. Ces divers cas se présentent continuellement dans l'Horlogerie et dans toutes les machines.

821. On peut considérer la mécanique sous deux points de vue : l'un tout pratique, et dont nous indiquerons les principales méthodes ; l'autre uniquement rationnel ou spéculatif, dit *Newton* (Nioutonn), et qui procède dans ses opérations par des démonstrations exactes. Le premier s'applique aux cas simples, d'après l'expérience commune ; sous le second point de vue, on emploie la géométrie et le calcul pour se rendre un compte exact des forces employées et transmises, des résistances et du produit des effets. La science, nous l'avons dit, n'est fondée elle-même que sur des expériences pratiques ; mais elle y joint l'analyse et les moyens de mesurer avec précision les puissances et les obstacles, la quantité du mouvement simple ou composé, etc. ; l'analyse fait prévoir à l'inventeur les résultats d'une première conception, son succès ou son impossibilité, ou les corrections nécessaires avant l'exécution. Nous ne négligerons donc pas non plus les moyens de calcul, lorsqu'ils seront accessibles à un certain nombre de lecteurs, et nous indiquerons pour le reste les auteurs qui en ont traité spécialement ; les moyens pratiques, basés sur le calcul, seront aussi employés au besoin.

822. Le nom de *mécanique*, du grec μηχάνη, art, adresse, machine, est particu-

lui-même réserve près de la deuxième moitié du 1er volume de l'*Essai*, le long chapitre XXXVI, à une classe particulière de lecteurs, et prévient les autres qu'ils peuvent le passer sans le lire : aussi faisons-nous de même, quoique dans un sens opposé. Cette partie de *Berthoud* a été fort abrégée dans notre 1er volume; mais nous aurons ailleurs occasion d'y revenir, comme il l'a fait aussi à la fin de son second volume.

NOTA. L'art *libéral* de l'Horlogerie est aujourd'hui presque détruit en France, et, quoiqu'il soit bien tard, il n'en est que plus urgent de le remarquer. Le mal provient en partie de la surabondance, du vil prix et de la mauvaise qualité des produits communs du commerce et de la bijouterie en ce genre, dont le débit, trop général, et les réparations mal rétribuées paralysent toute disposition à s'instruire ; ce mal est aussi l'effet du très-grand nombre, de l'ignorance et du charlatanisme de ceux qui, sans études suffisantes, prennent si librement le titre d'Horloger ; sous ce rapport, l'Horlogerie est descendue chez nous à son plus bas et dernier période : d'où l'on peut prévoir à coup sûr une crise prochaine et violente pour les ignorants, mais salutaire à l'art, dont elle écartera les incapables. La partie civilisée du public, dégoûtée des déceptions continuelles, instruite par une triste expérience qui se fait déjà sentir, et par les livres d'Horlogerie mis à sa portée, deviendra tout à coup défiante et difficile. Elle ira aux informations et ne s'adressera qu'à des artistes d'élite, ayant évidemment étudié. Les opuscules du jour entre les mains des Horlogers ne suffiront pas pour rassurer les propriétaires. Il faudra prouver qu'avec de vraies et suffisantes études pratiques, on possède les bons auteurs au niveau de l'époque.

Or, pour se préparer à cette direction forcée et imminente des esprits, il faut s'instruire ou se résoudre d'avance à rester bientôt confondu parmi ce qu'on appelle vulgairement *patraqueurs*, à n'être occupé que des ouvrages du dernier genre, de rhabillages à vil prix, et à végéter en un mot fort au-dessous de la médiocrité. Nous avons déjà donné cet avis, dont profitera qui pourra. Et, après l'événement accompli très-prochainement, nul ne pourra se plaindre d'une catastrophe qu'il aurait dû prévoir de lui-même.

lièrement assigné à l'étude du mouvement des corps, et le nom *statique*, du latin *stare*, s'arrêter, rester, est donné à l'étude de l'équilibre, parce que son effet est le repos, ou tout au plus le balancement oscillatoire, quoique l'on distingue toujours dans l'équilibre en repos une tendance au mouvement, ce qui l'a fait nommer par quelques auteurs *équilibre forcé*. La statique se divise en deux parties : 1° l'équilibre dans les solides et les diverses machines, simples ou composées ; 2° l'équilibre dans les fluides, sous le nom d'*hydrostatique*, du grec ὕδωρ, eau, et de ἵσταμαι, je me tiens.

823. On appelle proprement *dynamique*, de δύναμις, force, puissance, l'étude des *forces* des corps qui agissent les uns sur les autres, soit en se poussant, soit en se tirant, ou d'une autre manière, au moyen d'autres corps interposés, tels qu'un fil solide, un lien, un levier inflexible, un plan, etc.

824. Lorsque les deux bras de même longueur du fléau d'une *balance* ordinaire sont maintenus horizontalement par deux poids égaux, ils offrent l'exemple le plus commun de l'*équilibre forcé* de deux corps qui, bien qu'immobiles et contenus l'un par l'autre, tendent néanmoins au mouvement. Dans la *balance romaine*, composée au contraire de deux bras inégaux, il faut que l'inégalité du poids et de la matière pesée soit en sens *inverse* des longueurs des bras de levier pour produire l'équilibre. La puissance et la résistance s'estiment mécaniquement dans ces deux balances et dans tous les autres mouvements des machines, soit par les vitesses avec lesquelles les corps en opposition tendent à se mouvoir, soit par les longueurs *réelles* ou *virtuelles* des bras d'un levier droit, courbe ou angulaire, suivant les cas, comme on le verra plus loin ; l'une de ces quantités peut se substituer à l'autre et en même sens.

825. Nous exposerons d'abord ici le principe de l'équilibre produit par les bras du levier droit, comme le cas le plus simple et le plus évident auquel on puisse réduire ce qui concerne le mouvement des corps qui agissent les uns sur les autres.

826. Quand au *mouvement* en lui-même, la science le définit : « L'état d'un corps par « lequel celui-ci correspond successivement à différents lieux ou à divers points de l'es- « pace. » Le transport d'un corps d'un lieu dans un autre est un de ces faits évidents par eux-mêmes, et qui, bien constatés, n'exigent point de démonstration, quelle que soit la série des causes qui les produisent. Un fait naturel, existant constamment, n'a pas absolument besoin d'être expliqué : il suffit d'en connaître les diverses intensités et les résultats. Ce même *mouvement*, par exemple, peut être de différente espèce. On distingue le mouvement uniforme, accéléré ou retardé uniformément, ou avec progression ; il peut être en ligne droite et produit par une cause instantanée ou continue, ou en ligne courbe qui suppose nécessairement au moins deux causes, dont l'une est immédiate et continue ; le mouvement peut être considéré comme absolu ou *relatif*, etc. La théorie et les lois du mouvement, prises sous ces divers points de vue, sont des questions de mécanique traitées au long dans des ouvrages spéciaux, où l'on trouvera tous les problèmes de ce genre. Nous mentionnerons dans ces articles ce qu'il est indispensable d'en connaître pour les travaux de l'Horlogerie et pour les besoins principaux de la mécanique ; ces articles, bien compris, suffiront presque généralement.

827. Nous devons donc traiter avec un certain détail ces premières notions des effets de la nature et des propriétés physiques des corps dont il s'agit ici, car, s'il faut connaître à fond les moyens qu'on emploie, c'est surtout en Horlogerie et en mécanique qu'il est essentiel de raisonner avec justesse, et l'on ne peut le faire si l'on n'est pas au courant des acquisitions de la science sur la puissance des corps en mouvement et des distinctions qu'elle a établies. Il faut donc être instruit de ces principes; et après avoir raisonné avec méthode, autant que possible, il faut encore s'assurer, par quelques expériences partielles, de la justesse des conclusions raisonnées. Car, de quelque esprit géométrique que l'on soit doué, les expériences *bien faites* sont des certitudes, et l'on n'est pas aussi sûr de bien raisonner. Quant aux expériences que le raisonnement indique, il y a aussi manière de les établir pour ne pas laisser influer sur les résultats, d'autres causes que celles dont on veut connaître les effets, afin de conserver l'identité pure de l'état de la question. Nous insistons d'autant plus sur le raisonnement et l'expérience, que l'absence de ces deux moyens n'est que trop commune dans les premières études d'Horlogerie, et même à la suite; et que, d'ailleurs, il est encore bien des questions difficiles et irrésolues qui exigeraient une étude toute particulière de ces points délicats que le génie d'*Huyghens* n'aurait approfondis qu'avec peine, malgré toutes les ressources de la géométrie et du calcul, et dont sa fin prématurée nous à peut-être privés. Il aurait pu diriger ses moyens d'analyse sur l'échappement des Montres, sur le mouvement de leur balancier circulaire, sur son poids, sa grandeur, les forces du spirale, les engrenages, etc., comme il le fit sur le pendule qu'il appliqua le premier à l'Horloge, sur le centre d'oscillation, etc. *Huyghens* connaissait son sujet; il y portait la main, comme il travailla lui-même les objectifs du *télescope*, qu'il avança et perfectionna beaucoup pour son temps. Aujourd'hui la science dédaigne ces questions pratiques, et, ne connaissant point assez toutes les exigences et la complication de leurs détails dans l'Horlogerie et la mécanique délicate, les solutions qu'elle donne sont assez souvent, ou trop difficiles, ou parfois inapplicables. En un mot, il faudrait, pour atteindre la perfection de l'art que nous traitons, être à la fois habile Horloger et profond géomètre, et avoir le temps et les moyens de vérifier, par des expériences multipliées, les solutions trouvées par le calcul. Mais malheureusement cette réunion de circonstances manque généralement, et l'on *tâtonnera* peut-être encore longtemps.

828. La quantité de force d'un corps en mouvement est estimée comme étant le produit de la masse multipliée par sa vitesse, c'est-à-dire par l'espace que cette masse parcourt dans un temps donné; ainsi, deux corps de masses inégales ont néanmoins des quantités égales de mouvement, si les espaces parcourus dans un même temps par chacun d'eux sont d'une étendue inverse à leurs masses. Et, par exemple, une masse comme 1, parcourant un espace comme 2, a autant de force de mouvement pour vaincre les mêmes obstacles qu'une masse double, ou comme 2, parcourant un espace comme 1 pendant le même temps donné. Les vitesses suivent les rapports exprimés par les espaces parcourus dans un même temps, et *vitesse* ou *espace parcouru* deviennent ici synonymes. Dans la langue géométrique les rapports des leviers, des espaces, des vitesses, sont dits *récipro-*

ques, c'est-à-dire *inverses*, des masses ou puissances. Les quantités de force ou de mouvement, prises en un point quelconque de la course d'un corps, s'appellent des *moments*; et les deux corps de cet exemple, étant en équilibre, puisque les masses sont exactemen compensées par les vitesses, ou du moins par leur tendance à ces vitesses, sont dits avoir des *moments* égaux; ce mot s'emploie particulièrement dans la *statique* pour désigner le produit d'une puissance par le bras du levier *virtuel* auquel elle est appliquée, ou, ce qui revient au même, par la distance de sa plus courte direction au point d'appui, suivant une ligne perpendiculaire à la direction de la puissance; celle-ci a d'autant plus d'avantage, tout égal d'ailleurs, et son moment est d'autant plus grand, qu'elle agit par un bras plus long de ce levier *virtuel* et direct que l'on vient d'indiquer. *Moment* est donc la puissance produite par la masse, multipliée par la vitesse d'un corps en mouvement, à chaque point où on le considère; s'il est arrêté, avec sa seule tendance au mouvement, son *moment* initial est son poids même, estimé avec la balance, par celui connu du corps qui lui fait équilibre (1). Mais si le corps est entretenu dans son mouvement, non par une première impulsion instantanée, mais par une action continue sur lui et uniforme, la puissance de ce corps est alors estimée comme le produit de sa masse, multiplié non par sa simple vitesse, mais par le *carré* de cette vitesse, ainsi qu'il arrive lors de la descente des corps dans le vide, l'attraction centrale continue étant dans ce cas censée uniforme, vu la petite partie parcourue du rayon terrestre. Si la force agit en augmentant suivant une progression plus forte, la puissance s'accroîtra encore plus rapidement que le *carré*; si elle éprouve au contraire des obstacles assez sensibles, mais inférieurs à sa puissance, celle-ci se réduira d'autant. Cette question de la simple vitesse, ou du *carré* de cette vitesse, a même divisé les géomètres; mais ce n'est pas ici le lieu d'entrer dans ces détails, qui se représenteront dans la suite de ces articles, et nous suivons à cet égard l'opinion la plus générale.

829. L'*inertie* des corps est une propriété commune de la matière (propriété considérée un moment comme séparée de toute autre) de conserver son état, soit de repos, soit de mouvement, à moins qu'une cause étrangère ne le fasse changer. Cette propriété se manifeste lorsqu'une action quelconque fait effort pour changer cet état. Lorsque l'inertie du corps s'oppose plus ou moins à ce qui agit pour le mettre en mouvement, on appelle cette propriété *résistance*; l'inertie devient *action* ou *puissance*, lorsque la masse est en tendance ou en mouvement pour vaincre un obstacle.

830. En effet (abstraction faite de quelques autres propriétés physiques plus ou moins inhérentes à la nature des corps), la masse ou solidité de la matière, considérée seule et à part, ne peut se donner elle-même le mouvement, ni détruire par elle-même un mouvement qu'elle aurait déjà reçu; elle ne peut être tirée de l'état de repos ou de mouvement que par ce qu'on appelle puissance, force motrice ou autre action étrangère, soit instantanée, soit constante ou persistante, produite par une cause extérieure, comme il vient d'être dit, ou par *certaines propriétés de la matière* que nous avons écartées pour le mo-

(1) L'état initial de ce poids est cité ici à part de la loi de la descente des corps donnée plus loin.

ment; et le corps en mouvement, s'il n'éprouve ni frottement ni résistance du milieu, ni autres obstacles, doit persister indéfiniment en ligne droite, suivant la dernière direction du mouvement reçu, à moins qu'une autre cause ne vienne agir sur ce corps. Par la même raison, ce mouvement ne peut être retardé ou suspendu complétement que par des obstacles suffisants pour le ralentir à un degré quelconque, ou pour l'absorber entièrement. On entend par *milieu résistant* tout fluide dans lequel le corps se meut, ou la sphère d'attraction de quelque autre corps à portée d'agir sensiblement sur lui. On doit en inférer autant de l'état primitif et relatif de repos d'un corps; il ne peut de même être tiré de cet état de repos que par des causes analogues. Quant aux *propriétés* ci-dessus, voir chap. VII.

831. Mais tout être perceptible à nos organes, ou assez subtil pour leur échapper, ayant naturellement ou devant être supposé par analogie avoir diverses propriétés qui lui sont inhérentes et constituent sa nature même, sa manière d'être, telles que la gravitation ou attraction, la répulsion, le magnétisme, l'électricité à des degrés variables, les affinités chimiques et nombre d'autres propriétés, dont plusieurs seront longtemps inconnues, il en résulte que ces êtres sont toujours en tendance d'action dans certains points, ou qu'ils agissent actuellement dans d'autres, en modifiant sans cesse les agrégations temporaires qu'ils on produites; d'où l'on conclut que l'ensemble est dans un mouvement et un changement perpétuel dû à des propriétés inhérentes aux corps, et qui sont la cause du mouvement général de la nature. Cette opinion n'offre d'ailleurs rien de contraire au principe d'une puissance supérieure présidant à l'ensemble de l'univers.

832. Le mouvement, en mécanique, est produit par une force agissant dans une direction qu'il faut connaître, ou par plusieurs forces qui conspirent plus ou moins directement à produire un mouvement *résultant* de leur ensemble. De là on distingue la *composition* des forces et leur *résolution* ou décomposition, dont l'étude prend le nom cité plus haut de dynamique, comme on comprend à la fois, sous le nom de *mécanique-statique*, le mouvement et l'équilibre.

833. On appelle *puissances mécaniques* les machines simples, telles que le *levier*, le *treuil* et le *cabestan*, la *poulie* et les *moufles*, le *plan incliné* et le *coin*, enfin la *vis*, qui se compose des deux dernières; mais on peut réduire toutes ces puissances à deux seules, le *levier* et le *plan incliné*, dont au fond se composent toutes les autres dites simples, comme aussi les machines les plus compliquées; on y fait abstraction de plusieurs agents physiques, tels que le cours naturel ou préparé des eaux, l'expansion de la vapeur, l'électricité, le magnétisme terrestre, même la gravitation, considérés plutôt comme des *forces motrices primitives*.

834. Le fléau de toute balance n'est qu'un levier, la poulie est un levier; la machine funiculaire, où le rapport de la tension des cordes n'est qu'une manière d'apprécier l'action de plusieurs poulies, se forme, de même que les précédentes, d'une réunion de leviers, qui, comme les rouages dentés, se résout en une succession insensible de ces mêmes leviers, se remplaçant continuellement, sur des points indéfiniment rapprochés et sans intervalle appréciable.

835. La puissance et l'effet du levier, et la mesure des forces transmises par les engrenages ou par l'action des bascules et détentes, enfin par le mouvement des mobiles de toute machine quelconque, sont à étudier à fond par l'Horloger et par tout artiste mécanicien. La connaissance en est nécessaire dans les cadratures, non pour imiter des dispositions déjà connues, éprouvées et adoptées, auxquelles il faut néanmoins apporter autant d'attention que d'exactitude, et l'instruction en ce cas même n'est pas un faible auxiliaire pour les copier plus exactement; mais c'est surtout lorsqu'on s'écarte des modèles, des dispositions ou dimensions usitées, soit pour faire mieux (comme dans la cadrature de *Lépine*), soit pour le déplacement des mobiles, lors de changements obligés, soit enfin pour produire des effets nouveaux ou différents. Il faut alors avoir la certitude de ne pas altérer les principes fondamentaux de la mécanique et de raisonner juste, ce qu'on ne peut bien obtenir sans une partie au moins des connaissances préliminaires dont il s'agit dans ces chapitres; car ceux qui y réussissent, sans principes arrêtés, définis, en font naturellement une sorte de calcul mental; mais il ne leur est que trop aisé et trop commun d'y être trompés.

836. On croira pouvoir objecter que l'on voit réussir des inventions heureuses entre les mains d'auteurs artistes qui n'ont pas suivi directement ni avec régularité les études que nous paraissons préconiser ici avec tant d'instance; mais alors on oubliera que ces mêmes artistes ont acquis une partie de ces études dans une longue pratique, assidue et réfléchie; moyen qui, employé tout seul, n'est certainement pas le plus court : comme dans l'étude des langues, l'usage seul et la communication verbale demandent beaucoup plus de temps, ont un effet moins complet et moins sûr, occasionnent plus souvent des erreurs importantes que l'étude grammaticales et par principes. On oubliera, disons-nous, que ces artistes d'élite ont réuni une sagacité particulière et rare à l'expérience continue qui a fini par les instruire, mais toujours incomplétement; que l'esprit observateur et réfléchi devient naturellement géomètre, mais par une route plus longue, moins certaine et plus difficile; que l'ensemble de toutes les expériences humaines antérieures, qui s'appuient mutuellement pour établir des règles générales, est un moyen plus assuré et plus expéditif pour arriver au but sans autant de tâtonnements, et surtout pour arrêter à temps des projets hasardés que le raisonnement et le calcul, basés sur l'instruction, auraient indiqués de suite comme ne pouvant réussir. Ces artistes, formés par la nature, obtiennent quelquefois des succès, en suppléant, comme nous l'avons dit, aux études théoriques par de longs travaux; mais ils n'ont pas tiré la plupart du temps d'une idée heureuse tout l'avantage qu'elle comporte; et, nous l'avons déjà observé ailleurs, un artiste adroit et intelligent fera sans principe ce qu'on nomme un *bon engrenage courant*, et qui n'arrêtera pas, mais qui ne mènera pas uniformément, ni avec le moins possible d'usure et de perte de force, si l'on n'y a pas appliqué la connaissance géométrique ou les bons moyens pratiques qui en découlent. C'est ainsi que des cadraturiers, habiles dans diverses parties du mécanisme renfermé sous le cadran d'une répétition, ne peuvent souvent parvenir à donner à une *crémaillère dentée* un engrenage doux et coulant, ou à faire frapper les derniers coups des quarts

avec la force et la vitesse convenables, et ces effets ne manquent que trop. On a vu des artistes fort en vogue atteindre rarement cette perfection, ou ne pas en connaître le moyen, tandis que les répétitions de *Lépine* avaient toutes ces avantages. Mais celui-ci avait bien étudié ces parties de son art et le principe des engrenages, témoin ses dentures dites en rochet, mais à courbures convenables de leur excédant plus étendu, pour améliorer la menée du pignon de 8, auquel on n'osait pas alors substituer celui de 10. Ces dentures n'ont été abandonnées qu'à cause de l'augmentation de la main-d'œuvre, dont la réduction paraît si importante pour le commerce, que l'on y a préféré des engrenages moins parfaits; car l'économie du travail s'accorde rarement avec la perfection.

837. On conçoit enfin que, généralement, pour diriger avec sûreté les travaux de la manière la plus favorable aux effets désirés, pour réduire les résistances, les frottements, ménager *convenablement* les forces, éviter autant que possible l'usure et la destruction dans des machines délicates, précises et dans une action continuelle, il est indispensable de connaître les principes de composition de ces instruments. Nous ne pouvons donc trop nous appesantir sur ce sujet, malgré l'impatience du lecteur, et engager les élèves à étudier attentivement les notions élémentaires qui vont suivre, et qui, mises à la portée la plus commune, suffiront dans la plupart des cas, et les aideront à en déduire pour le reste des conséquences plus élevées, au moyen des ouvrages spéciaux qui en traitent *ex professo*, et qui seront indiqués.

DU LEVIER EN GÉNÉRAL.

838. Il faut considérer dans tout levier trois points distincts, indiqués dans les figures 1, 2, 3, 4, 5, 6, pl. XXII : 1° celui de la puissance P; 2° celui d'un point d'appui A; 3° celui de la résistance R de l'objet à soulever ou à mouvoir.

839. Les situations de ces trois points peuvent avoir lieu de trois manières différentes, et constituent trois espèces de levier.

840. Dans la première espèce, le point d'*appui* A est placé entre la puissance P et la résistance R, qui occupent les deux extrémités du levier, comme dans les figures 1 et 2.

841. Dans la deuxième espèce, la puissance P étant à une extrémité lu levier, c'est le point d'appui A qui est à l'extrémité opposée, et la *résistance* R est entre elles deux, comme dans les figures 3 et 4.

842. La troisième espèce de levier est celle où, le point d'appui A étant à une extrémité, et la résistance occupant l'extrémité opposée, c'est la *puissance* qui est entre elles deux, comme dans les figures 5 et 6.

Du levier de première espèce.

843. Le levier de *première espèce* étant représenté, comme ci-dessus, fig. 1 et 2, on y voit que la puissance P et la résistance R occupent les deux extrémités du levier PAR, et que le point d'appui A est intermédiaire.

844. On conçoit que si, dans la figure 1, la puissance en P produite par le poids *p* est égale à la résistance en R produite par un autre poids *r* égal à *p*, et si le point d'appui A est exactement au milieu de la distance des deux autres points, les deux bras PA et AR étant ainsi égaux, et les deux forces égales *p* et *r* appuyant avec le même avantage sur le point d'appui A, pour entraîner le levier chacune de son côté, ce levier restera immobile, et qu'il y aura entre les deux forces un parfait *équilibre*. On pourra même substituer P à R en les faisant alterner de place, sans changer cet équilibre, puisque dans ce changement deux forces égales seront toujours à la même distance du point d'appui. Cet effet est assez évident par lui-même et se trouve fréquemment sous les yeux dans l'usage commun de l'instrument si connu qu'on nomme *balance* ordinaire du commerce, avec ses deux bassins, soit vides, soit chargés chacun d'un poids égal, comme *p* et *r* supposés ici parfaitement égaux.

845. Si, maintenant, nous altérons l'égalité de longueur des bras du levier de la figure 1, en déplaçant le point d'appui A, comme dans la figure 2, dont le levier est toujours de première espèce, le bras PA dans cette figure 2 se trouvera avoir, par exemple, trois fois la longueur du bras AR (vu que la longueur totale PR se trouve divisée en quatre parties, trois en P et une en R, en sorte que les longueurs des deux bras sont entre elles *comme* 3 *est à* 1); alors nous serons obligés, pour conserver l'équilibre, de rendre aussi les poids inégaux, dans la même proportion que les bras, mais toutefois *en sens inverse*, c'est-à-dire que nous ferons le poids *r*, fig. 2, triple de celui *p*, ou nous ferons *p* un tiers de *r*, ce qui revient au même, et dans ce cas, quoique le point d'appui A ne soit plus au centre du levier, les deux poids inégaux seront encore en équilibre, parce que le poids *r* sera à celui *p en raison inverse* de la distance RA, comparée à la distance PA. Nous expliquerons un peu plus loin et d'une autre manière la cause de ce renversement des rapports, en employant une autre démonstration de l'effet de poids inégaux sur des leviers aussi à bras inégaux, et où l'inégalité des poids est placée en sens *inverse* de l'inégalité des bras.

846. Si la distance P4, même figure 2, est quatre fois la distance 4R, le point d'appui étant transporté en 4 (le levier total se trouvant alors divisé en 5 parties), il ne faudra en P que le quart du poids de R pour faire équilibre à ce dernier.

847. Si, au contraire, le point d'appui était en *a*, le bras P*a* n'étant alors que le tiers du bras *a*R, il faudrait, pour l'équilibre, que la puissance en P fût trois fois plus grande que la résistance en R.

848. Il en sera de même de toute autre division de la longueur totale du levier, où l'inégalité des bras doit, pour l'équilibre, être compensée par une semblable inégalité des forces ou masses, toujours placée *inversement* de celle de la longueur des bras.

849. On peut remarquer aussi que le point d'appui A supportera à la fois les forces réunies des deux poids des figures 1 et 2, quels que soient ces poids en raison des diverses divisions du levier. Car si la chape qui supporte le couteau A du milieu de la balance, fig. 1, était attachée en B, sous le bassin pointillé d'une seconde balance semblable, elle pourrait y être équilibrée en chargeant l'autre bassin de cette seconde balance sup-

posée, par un poids égal à tout l'appareil de la première balance, c'est-à-dire de son fléau, de sa chape et de ses deux bassins, plus celui des deux poids en équilibre. Or les poids égaux de la figure 1, étant supposés chacun d'une livre, entreraient pour la somme de 2 livres dans le compte total. Et dans la figure 2, ce serait pour la somme des deux poids, variables ici suivant la division du levier. En un mot, le point d'appui A n'est jamais chargé que de la totalité des deux poids qui se font équilibre, et si une livre d'un côté est équilibrée par un quart de livre de l'autre bout, suffisamment long, l'appui A ne portera dans cet état d'équilibre qu'une livre un quart, plus la pesanteur propre du fléau ou levier, dont nous faisons toujours abstraction. S'il y a mouvement, il y faudra ajouter la force employée à rompre l'équilibre, ou à vaincre les obstacles, que nous ne considérons pas non plus ici.

850. On conçoit encore que l'égalité des deux poids p et r, et celle des deux bras A P et A R, fig. 1, constitue ici l'équilibre des deux corps et leur état de repos. Car, abstraction faite du frottement sur le point d'appui A, supposé ici tout à fait nul, et où la forme angulaire du couteau en produit en réalité très-peu, il suffirait pour donner du mouvement à P, par exemple, et en sens contraire à R, d'augmenter d'une légère quantité la masse de l'un des deux corps, ou d'altérer très-peu l'égalité de longueur de l'un des bras du levier. L'égalité de ces bras et de leurs accessoires est indispensable dans la balance ordinaire, prise ici pour exemple ; mais on verra que, dans les machines, les deux bras des leviers sont rarement égaux, et que leur inégalité est déterminée pour produire en mécanique la quantité d'effet voulue.

851. Si l'on veut considérer le levier de la figure 2, par exemple, comme le fléau d'une balance, il faut faire abstraction de la pesanteur propre des bassins et de leurs chapes ou crochets ainsi que des bras du levier, ou bien altérer aussi leurs pesanteurs en mêmes sens et proportion que celles des poids. Mais, dans les articles suivants, nous ferons toujours abstraction de ces accessoires, en considérant les longueurs seules des bras du levier, supposé sans pesanteur et inflexible.

852. Nous avons pris ici la balance pour exemple, afin de rendre la question plus intelligible, et pour ce que nous aurons à dire sur les conditions d'une balance exacte ; nous remarquerons en attendant qu'il est un moyen simple de reconnaître sur-le-champ une balance fausse et trompeuse, dont les bassins sont en équilibre étant vides, et ne le sont plus lorsqu'on les charge de deux poids égaux ; ces balances fausses ne sont en équilibre qu'avec des poids inégaux. Quand ce défaut existe à dessein, on place la marchandise du côté où le bassin est plus léger, et le bras un peu plus long ; alors il en faut moins pour faire équilibre ; or, pour reconnaître la supercherie, il suffit de changer le poids et la marchandise d'un bassin dans l'autre, la différence réelle des deux poids devient double et d'autant plus sensible. Mais outre l'utilité usuelle de cette remarque, nous devons dire ici que si la balance exacte est un instrument indispensable en physique, comme celle dite de *Fortin*, elle n'est pas moins utile en Horlogerie, où l'on a souvent à observer le poids exact des corps, particulièrement pour les pièces de précision et pour les Horloges marines, dont les masses réglantes et compensantes du balancier, et d'autres parties,

veulent être pesées scrupuleusement dans ce qu'on appelle des *balances d'essayeur*, très-délicates et très-chères. Néanmoins un Horloger intelligent peut exécuter une balance de ce genre avec une grande supériorité, quand il en sait le principe, en la disposant de manière à la rendre sensible et vérifiable à volonté, détails que nous donnerons ailleurs accompagnés de figures. Nouvelle preuve qu'une foule de connaissances sont utiles à l'artiste, et qu'il est toujours avantageux de *s'instruire*, et de s'habituer à raisonner, à suivre un texte, au lieu de n'en considérer superficiellement que les planches.

853. On vient de voir ci-dessus que, pour conserver l'équilibre avec un levier à bras inégaux, la force appliquée doit être d'autant moindre que le bras par lequel elle agit est plus long; ou qu'elle doit être d'autant plus grande que ce bras est plus court; et qu'enfin la masse du bras le plus court doit surpasser autant la masse opposée, que le bras plus long de celle-ci surpasse le bras le plus court de la masse plus forte : c'est ce qu'on entend par *rapport inverse*, dit aussi *réciproque*.

854. Telle est la théorie du levier de première espèce, et nous allons voir que celle des deux autres espèces est, sinon semblable, du moins analogue à la précédente.

855. Ce qu'on appelle *bascule* en mécanique, lorsque l'appui, le pivot, l'essieu, en un mot le centre de mouvement, se trouve entre les deux points d'action, de la puissance et de la résistance, appartient au levier de la première espèce.

856. Le principe de l'*équilibre* est un des plus importants de la mécanique, et l'on peut y réduire tout ce qui concerne le mouvement des corps, qui agissent les uns sur les autres, en considérant en même temps la direction des forces, leur intensité et les lignes réelles ou *virtuelles* des bras du levier qui transmettent l'action. Chaque *bras* est souvent nommé à part du nom de *levier*.

857. Cela n'empêche pas que l'équilibre ne doive ensuite être rompu par le mouvement que les machines ont à exécuter; car, quand on connaît les conditions primitives de l'équilibre dans un cas donné, il est facile d'ajouter, au bras de levier de la puissance, la longueur, ou, sans changer celle-ci, d'ajouter à la puissance même la quantité de force propre à rompre l'équilibre, à vaincre les résistances, les frottements et autres obstacles, pour produire le mouvement avec la force et la vitesse exigées.

858. Nous entrons, comme on le voit, dans de longs raisonnements sur cette matière, lorsque nous aurions pu l'exposer d'une manière bien plus serrée et plus géométrique. Mais un trop grand nombre de lecteurs ne nous auraient pas entendu et se seraient dégoûtés de la sécheresse de simples démonstrations géométriques. Nous préférons d'avancer pas à pas dans le début, pour ceux à qui ce genre n'est pas familier, parce qu'il est essentiel de posséder complétement cette théorie fort simple en elle-même, et d'autant plus importante, que les leviers des trois espèces sont les premières bases de la mécanique, et que dans toute science, ce sont les bases, les principes, qu'il faut connaître imperturbablement, puisque, dans la composition ou l'examen des machines, ils servent à vérifier les erreurs, à lever les doutes que l'on peut éprouver. Nous engageons

donc le lecteur à se rendre entièrement maître de cette théorie, que l'attention rendra facile à saisir.

Du levier de seconde espèce.

859. Les figures 3 et 4 représentent des leviers de *seconde espèce*, où la *résistance* R, au lieu d'être à l'une des extrémités du levier PA, est placée entre la puissance P et le point d'appui A, situés chacun à l'une des extrémités.

860. Dans la figure 3, la *résistance* R, c'est-à-dire le poids à soutenir ou à mouvoir, étant à la moitié de la distance PA, milieu du levier total, cette résistance, ou ce poids *r*, agit autant sur A point d'appui, que sur P puissance, et son action comme pesanteur ou obstacle quelconque, se divise par moitié sur chacun de ces points ; car si le poids *r*, supposé d'une livre, agissait de toute sa pesanteur, ou seulement de plus que sa moitié de cette pesanteur sur l'un ou sur chacun des deux points extrêmes, il y aurait deux livres supportées, ou au moins plus d'une livre, ce qui ne peut avoir lieu évidemment puisqu'il n'y a qu'une livre en tout de poids. Or, comme les points P et A sont également éloignés de R, et qu'aucune autre cause particulière ne peut charger l'un de ces points plus que l'autre, il s'ensuit invinciblement que chacun de ces points doit supporter une des deux portions égales du poids, et que cette portion égale à l'autre ne peut être qu'une moitié du tout. Donc la puissance P capable de soutenir R, ou de lui faire équilibre, ou enfin d'être infiniment près de le mouvoir, ne peut être que la moitié de la résistance R. C. Q. F. D.

861. On devine ce résultat simple au premier coup d'œil, mais c'est pour en suivre le raisonnement logique que nous entrons quelquefois dans ces détails, à la manière de *Camus*, bon *géomètre instructeur*, pour que les lecteurs *inhabitués* soient intimement convaincus des principes dont ils doivent tirer par la suite des conclusions exactes. D'autres propositions ne sautent pas toujours aux yeux, comme l'on dit, avec la même facilité, et nous en laissons aussi quelquefois chercher les raisons, comme exercice à faire d'après de tels exemples.

862. Mais si l'on déplace plus ou moins le poids ou résistance *r*, et s'il agit sur un autre point R, comme dans la figure 4, AR étant ici, par exemple, un quart de la longueur totale du levier, et PR étant les trois autres quarts, il s'ensuivra que R appuiera plus sur A que sur P, et en proportion toujours *inverse* des distances. Ainsi, R étant éloigné de P des trois quarts de la longueur totale PA, et de A d'un seul quart, la résistance *r* n'agira, par la loi du sens inverse, que d'un quart sur P, et de ses trois autres quarts sur A; et comme on le voit, la charge sera sur chacun de ces deux points en rapport *réciproque* de la distance entre A et chacun de ces mêmes points.

863. Ainsi, dans le levier de seconde espèce, les différences des distances sont comparées directement à la longueur totale du levier, qui ne forme plus qu'un seul bras, dont toutes les parties marchent dans le même sens.

864. Dans l'autre levier de la première espèce, les différentes longueurs des bras, agissant ou en tendance d'agir en sens contraire, étant séparées par le point d'appui inter-

médiaire, ces longueurs étaient comparées particulièrement entre elles, et non avec la longueur totale.

865. Mais dans le levier de *seconde espèce*, le point d'appui est déplacé suivant une autre combinaison, comme il a été dit (841); la puissance et la résistance sont portées ou marchent d'un même côté, à l'opposé du point d'appui ; leurs points se meuvent dans le même sens, et le rapport des distances a lieu directement avec la longueur totale du levier, dont la puissance et le point d'appui occupent nécessairement chacun une des deux extrémités ; les quantités de la puissance sont en raison *inverse* des espaces ou des arcs que les points P et R ont à parcourir du même côté dans le même temps, ou en raison *inverse* des rayons des arcs parcourus ou à parcourir par les deux points.

866. Si le point d'action du poids ou résistance était au contraire placé en R', c'est-à-dire du côté de P, et à un quart, par exemple, de ce côté de la longueur totale, même figure 4, P supporterait, par la même raison ci-dessus, les trois quarts du poids, et A n'en supporterait qu'un quart.

867. Enfin, si la résistance était en R'', sur un cinquième du levier, P supporterait les quatre cinquièmes de la résistance, et A n'en supporterait qu'un cinquième; et ainsi de toute autre division de la longueur totale du levier de *seconde espèce*, où la charge supportée est toujours en raison inverse des distances, comparées, non pas l'une à l'autre comme dans la *première espèce*, mais à la longueur totale de ce levier.

868. Chacun peut encore observer que si la charge de la résistance était tout à fait sur le point d'appui A, ou *infiniment* près de ce point, elle y agirait avec toute ou *presque* toute sa force, et que cette charge diminue pour le point d'appui à mesure que la résistance s'en éloigne, et s'approche du point de la puissance, qui en supporte alors une d'autant plus grande partie; et qu'enfin, si la résistance arrivait sur le point P, ou *infiniment près* de ce point, la puissance supporterait alors toute ou *presque toute* la charge, et que l'appui A ne supporterait plus ou *presque plus* rien, et ne serait pas même à considérer comme appui, mais seulement comme centre du mouvement angulaire du levier, et chargé seulement en partie du poids propre de ce levier, lorsqu'on en tient compte; mais nous avons annoncé en faire toujours abstraction dans ces articles, et l'on verra du reste, plus loin, comment, dans la réalité, on peut avoir égard au poids particulier du levier, lorsqu'il importe de le faire entrer en ligne de compte

Du levier de troisième espèce.

869. La troisième espèce de levier est celle où la *puissance* est entre la résistance et le point d'appui, comme dans la figure 5, où A est le point d'appui, à une extrémité du levier APR, et R la résistance à l'autre extrémité, en sorte que la *puissance* est en P et au milieu du levier de cette figure 5. Les dispositions de ce genre sont les plus défavorables à la puissance qui a toujours besoin d'y être plus grande que la résistance, pour produire l'équilibre des forces.

870. A étant supposé fixe et inébranlable, comme tous les points d'appui précédents,

et P étant à la moitié du levier, fig. 5, il y faut une puissance double de R pour faire équilibre à celle-ci. Car, si R était sur le même point que P, la puissance aurait à soutenir la résistance entière, ni plus ni moins, et devrait lui être égale pour l'équilibre; mais ici R, résistant à P par un levier RA double de PA, agit sur lui ou lui résiste comme une force double.

871. Si la puissance est, aux trois quarts du levier, en P, fig. 6, point plus rapproché de l'appui A, cette puissance devra être quadruple de la résistance R pour lui faire équilibre. Si la puissance est en *p*, aux 4/5es du levier, elle devra être quintuple, et ainsi de suite, c'est-à-dire en rapport *inverse* de toute leur distance au point d'appui.

872. Mais si la puissance est de l'autre côté du milieu en *p'*, et rapprochée de R, c'est-à-dire aux trois quarts de la longueur comptée vers ce côté, il faudrait à la puissance, 1° la force de la résistance; 2° plus 1/3 de cette force, pour faire équilibre à R; car R résiste à P par un levier RA qui dépasse le levier *p'* A, de 1/3 de ce dernier.

873. Nous avons vu que dans le levier de première espèce, à bras égaux, le point d'appui, soutenant des poids égaux et en équilibre, se trouve chargé de la somme réunie des deux poids, puisque les deux forces agissent dans le même sens et sans avoir plus d'avantage l'une que l'autre, mais que, si l'un des bras est plus long et chargé d'un poids d'autant moindre pour maintenir l'équilibre, la charge du point d'appui en sera diminuée d'autant, puisque en définitive, comme il a été dit, le point d'appui ne soutient que ce qui existe de poids attachés au levier (laissant de côté la pesantenr de ce levier). Mais avec les leviers de deuxième et troisième espèce, la charge de l'appui devient *égale à l'excès* de la plus grande puissance sur la plus petite, car les deux puissances agissent en sens contraire, et tout le levier tend à marcher vers le même sens.

874. En règle générale, si la puissance appliquée à un levier, de quelque espèce qu'il soit, soutient un poids, la puissance doit être au poids en raison *réciproque* ou *inverse* de leurs distances au point d'appui commun ; il en résulte que la puissance devient plus *petite* ou plus grande, ou égale au poids, selon que la distance *perpendiculaire* du poids à l'appui est plus *grande* ou plus petite, ou égale à la distance de la puissance à ce même point d'appui.

875. On peut conclure de tout ce qui précède : 1° que pour les leviers de la *première* espèce, la puissance peut être plus petite, ou plus grande, ou égale au poids ou résistance ; 2° que dans la *deuxième* espèce, la puissance est moindre, ou, au plus, égale à la résistance si les deux forces sont sur le même point ; 3° que dans la *troisième* espèce, la puissance doit toujours être plus grande que la résistance, cas défavorable à la puissance, comme dépense de force, mais compensé par plus de vitesse ou d'espace parcouru pour le corps ou le poids à mouvoir. Le levier de troisième espèce se trouve fréquemment employé dans la structure mouvante des animaux ; chez l'homme, par exemple, lorsque l'avant-bras est tendu horizontalement, et qu'un poids est soutenu par la main, l'avant-bras est un levier de troisième espèce dont le point d'appui est dans le coude, et dont la longueur est égale à l'avant-bras, plus la partie du poignet jusqu'au milieu de la main. Or ce levier est soutenu par une action de muscle, et, vu le rapprochement de l'attache voi-

sine du point d'appui, l'action est d'autant moindre à l'égard du poids que, de plus, le tirage du muscle est oblique; aussi l'effort musculaire est-il beaucoup plus grand que celui du poids. Mais il en résulte généralement, dans les animaux, un plus grand espace parcouru par l'extrémité des membres, pour un très-petit racourcissement des muscles. Quelques observateurs en ont pris occasion de conjecturer que, dans la formation des animaux, les moyens de force sont plus abondants que l'espace disponible; que la nature n'a pu disposer que des éléments que les circonstances primitives de cette formation laissaient à sa portée; et qu'avec d'autres circonstances la composition et l'organisation des animaux auraient été tout à fait différentes. Mais nos connaissances en ce genre sont trop peu avancées pour nous arrêter à des conjectures, et, en pareil cas, nous devons prendre les faits comme ils sont, sans chercher à expliquer ce que nous ne connaissons pas assez.

876. Lorsqu'une puissance, appliquée à un levier quelconque à bras inégaux, *enlève* un poids, alors il n'y a plus *équilibre*, mais il y a *mouvement* des deux côtés, et l'espace parcouru par la puisssance dans son mouvement est, à celui que le poids parcourt dans le même temps, comme la masse ou force du poids résistant est à celle de la puissance, ainsi qu'on l'a vu dans les propositions précédentes ; d'où il suit que l'avantage de la force mouvante, comme économie de force, est toujours accompagné d'une perte équivalente de temps, et réciproquement; et même la perte est un peu plus grande nécessairement, vu l'absorption inévitable de force par les frottements ou autres obstacles étrangers. Car, plus la puissance est petite, c'est-à-dire inférieure au poids, plus il faut qu'elle parcoure d'espace pour en faire parcourir un quelconque au poids, et l'espace parcouru par le poids *plus fort en masse* est toujours moindre que celui parcouru par la puissance *plus faible en masse;* c'est ce qu'établit l'axiome connu: « Ce que l'on acquiert en force « est dépensé en temps ou en espace parcouru, et réciproquement. » Et le *temps* est une valeur.

877. Nous avons déjà dit (828) que la quantité de mouvement d'un corps est le produit de sa masse par sa vitesse *dans un temps donné*, et qu'en supposant deux corps inégaux attachés aux extrémités d'une balance ou d'un levier à bras inégaux, si ces corps ou leurs masses sont en raison réciproque (inverse) de leurs distances à l'appui, ils seront aussi en raison réciproque des lignes qu'ils parcourront *en même temps*, ou des arcs de cercle décrits lorsque le levier tourne sur son appui, et que, par conséquent, ils auront alors des quantités égales de mouvement, ou, comme s'expriment la plupart des auteurs, des *moments* égaux. Nous rapporterons ici, à ce sujet, et pour continuer d'initier en ce genre ceux de nos lecteurs qui en auraient besoin, l'excellent article suivant du célèbre d'*Alembert*. On y verra que ce savant de premier ordre ne craignait pas qu'un sujet aussi simple pour lui parût long et diffus à certaines gens, pourvu qu'il en devînt plus intelligible.

« Par exemple, dit-il, si le corps A, pl. XXII, fig. 12 (1), est triple du corps B,

(1) Les distances dans la figure à laquelle nous renvoyons ne sont que comme 1 à 2, au lieu de 1 à 3; mais cela est indifférent pour la démonstration, attendu que les rapports tracés, toujours peu exacts,

et si dans cette supposition on attache les deux corps aux deux extrémités d'un levier AB dont l'appui soit placé en C, de façon que la distance BC soit triple de la distance AC, il s'ensuivra de là qu'on ne pourra faire tourner le levier sans que l'espace BE, parcouru par le corps situé en B, ne se trouve triple de l'espace AD parcouru en même temps par le corps A abaissé en D, c'est-à-dire sans que la vitesse de B ne devienne triple de celle de A, ou enfin sans que les vitesses des deux corps en mouvement ne soient *réciproques* à leurs masses. Ainsi les quantités des mouvements des deux corps seront égales; et comme ils tendent à produire des mouvements contraires dans le levier, le mouvement du levier deviendra par cette raison absolument impossible dans le cas dont nous parlons; c'est-à-dire qu'il y aura *équilibre* entre les deux corps.

« De là ce fameux problème d'*Archimède : Datis viribus, datum pondus movere.* (*Avec des puissances données, mouvoir un poids donné.*) En effet, puisque la distance CB peut être accrue à l'infini, la puissance ou le moment de A peut donc aussi être supposé aussi grand qu'on voudra par rapport à celui de B, sans empêcher la possibilité de l'équilibre. Or, quand une fois on aura trouvé le point où doit être placé le corps B pour faire équilibre au corps A, on n'aura qu'à reculer un peu le corps B, et alors ce corps B, quelque petit qu'il soit, obligera le corps A de se mouvoir. Ainsi toute la mécanique peut se réduire au problème suivant :

« *Un corps* A *avec sa vitesse* (*v*) *et un autre corps* B *étant donnés*, trouver la vitesse (V) qu'il faut donner à B, *pour que les deux corps aient des moments égaux*. Pour résoudre ce problème, on remarquera que, puisque le moment d'un corps est égal au produit de sa vitesse par la quantité de matière qu'il contient, il n'y a donc qu'à faire cette proportion, B : A : : *v* : un quatrième terme V qui sera la vitesse cherchée qu'il faudra donner au corps B, pour que son moment soit égal à celui de A. Aussi, dans quelque machine que ce soit, si l'on fait en sorte que la puissance ou la force ne puisse agir sur la résistance ou le poids, ou les vaincre actuellement, sans que dans cette action les vitesses de la puissance ou du poids ne soient réciproques à leurs masses, alors le mouvement deviendra impossible (1); la force de la puissance ne pourra vaincre la résistance du poids, et ne devra pas non plus lui céder, et, par conséquent, la puissance et le poids resteront en équilibre sur cette machine; si on augmente tant soit peu la puissance, elle enlèvera alors le poids; mais si on augmentait au contraire le poids, il entraînerait la puissance.

« Supposons donc, par exemple, que AB soit un levier dont l'appui soit placé en

sont censés être ceux du texte. Les figures tracées à la main sur un tableau noir ne sont jamais précises, mais les conséquences résultent des bases posées dans le texte, et non des proportions mesurées de la figure. C'est ainsi que la figure 12 sert à deux articles où les mesures sont différentes.

(1) On entend ici que, si la puissance et le poids sont entre eux dans un rapport réciproque ou inverse à leur distance au point d'appui, il n'y aura pas de mouvement. Nous n'expliquons cette phrase que pour ceux qui débutent dans cette matière. Nous prévenons aussi qu'il n'est question dans cet article que du levier de première espèce, quoique le même principe se puisse appliquer aux deux autres espèces. Mais, le levier de première espèce étant plus généralement connu, l'application y paraît plus simple, peut-être par l'habitude de la machine vulgaire dite *bascule*, ou autres cas pareils; mais le lecteur doit se familiariser également avec les trois espèces de levier, parce qu'elles sont aussi également fréquentes en mécanique.

C, même figure 12, pl. XXII, et qu'en tournant autour de cet appui il soit parvenu à la situation *a C b*, la vitesse de chaque point du levier aura été évidemment, dans ce mouvement, proportionnelle à la distance de ce point à l'appui ou centre de circulation, car les vitesses de chaque point sont comme les arcs que ces points ont décrits en même temps (et ces arcs, d'un même nombre de degrés, sont de rayons différents). Ces vitesses sont donc aussi entre elles comme les rayons des arcs de cercle décrits par chaque point du levier, c'est-à-dire comme les distances de chaque point à l'appui.

« Si l'on suppose maintenant deux puissances appliquées aux deux extrémités du levier, et qui fassent tout à la fois effort pour faire tourner ses bras dans un sens contraire l'un à l'autre, et que ces puissances soient réciproquement proportionnelles à leur distance de l'appui, il est évident que le moment ou effort de l'une pour faire tourner le levier en un sens sera précisément égal au moment de l'autre pour le faire tourner en sens contraire. Il n'y aura donc pas plus de raisons pour que le levier tourne dans un sens que dans le sens opposé. Il restera donc nécessairement immobile ou en repos, il y aura donc équilibre entre les deux puissances : c'est ce qu'on voit tous les jours, lorsqu'on pèse un poids (une masse de matière quelconque) avec une *romaine;* il est aisé de concevoir, par ce que nous venons de dire, comment un poids d'une livre peut, sur cette machine, faire équilibre avec un poids de 5 ou de 10, ou de 100, ou de 1,000 livres, et davantage, si elle est assez grande et solide.

« C'est par cette raison qu'*Archimède* ne demandait qu'un point fixe, hors de la terre, pour l'enlever. Car, en faisant de ce point fixe l'appui d'un levier, et mettant la terre à l'extrémité d'un bras de ce levier, il est clair qu'en allongeant l'autre bras on parviendrait à mouvoir le globe terrestre avec une force aussi petite qu'on voudrait. Mais on sent bien que cette proposition d'*Archimède* n'est vraie que dans la spéculation, puisqu'on ne trouvera jamais ni le point fixe qu'il demandait, ni un levier de la longueur nécessaire pour mouvoir le globe terrestre.

« Il est clair encore par là que la force de la puissance n'est point du tout augmentée par la machine, mais que l'application de l'instrument diminue la vitesse du poids dans son élévation ou dans sa traction, par rapport à celle de la puissance dans son action; de sorte qu'on vient à bout de rendre le moment d'une petite puissance égal et même supérieur à celui d'un gros poids, et que par là on parvient à faire enlever ou traîner le gros poids par la petite puissance. Si, par exemple, une puissance est capable d'enlever une livre, en lui donnant dans son élévation un certain degré de vitesse, on ne fera jamais, par le secours de quelque machine que ce puisse être, que cette même force puisse enlever un poids de deux livres, en lui donnant dans son élévation la même vitesse dont nous venons de parler. Mais on viendra facilement à bout de faire enlever à la même puissance le poids de deux livres avec une vitesse deux fois moindre, ou, si l'on veut, un poids de dix mille livres même avec une vitesse dix mille fois moindre.

« Plusieurs auteurs ont tenté d'appliquer les principes de la mécanique au corps humain; il est cependant bon d'observer que l'application des principes de la méca

nique à ce sujet ne doit se faire qu'avec une extrême précaution. Cette machine est si compliquée, que l'on risque souvent de tomber dans bien des erreurs en voulant déterminer les forces qui la font agir, parce que nous ne connaissons que très-imparfaitement la structure et la nature des différentes parties que ces forces doivent mouvoir. Plusieurs médecins et physiciens, de diverses nations, sont tombés dans l'inconvénient dont je parle ici. Ils ont prétendu donner, par exemple, les lois du mouvement du sang et de son action sur les vaisseaux; et ils n'ont pas pris garde que, pour réussir dans une telle recherche, il serait nécessaire de connaître auparavant une infinité de choses qui nous sont cachées, comme la figure des vaisseaux, leur élasticité, le nombre, la force et la disposition de leurs valvules, le degré de chaleur et de ténacité du sang, les forces motrices qui les poussent, etc. Encore, quand chacune de ces choses serait parfaitement connue, la grande quantité d'éléments qui entreraient dans une pareille théorie nous conduirait vraisemblablement à des calculs impraticables (1). »

878. Nous n'avons pas voulu tronquer cet article en privant le lecteur du dernier paragraphe, quoique son sujet sorte un peu de la matière que nous traitons. On y voit, du reste, la confirmation de ce que nous avions annoncé plus haut sur le peu de connaissances que nous possédons à l'égard d'un grand nombre de parties du corps humain. La médecine elle-même convient que l'action de certains organes entiers lui est encore inconnue; mais, depuis l'époque où l'auteur cité écrivait ceci, la partie la plus certaine de l'art médical, la chirurgie, a fait de grands progrès. Les études ostéologiques et myologiques ont développé clairement le mécanisme de la charpente osseuse, l'action sur elle des muscles, et même le mode d'irritation qui gonfle, et par là raccourcit ces muscles. Quant à l'observation sur l'avant-bras, elle est exacte et s'applique à presque tous les mouvements du corps. Le principe de compensation de la force acquise par la perte du temps est également inattaquable, et n'est point en opposition avec l'avantage que l'on tire des machines qui ménagent les forces humaines et remplacent avec succès un grand nombre de bras, mieux utilisés ailleurs. Cet avantage des machines dans les spéculations productives et commerciales est une tout autre question du ressort de l'*économie politique*,

(1) Le savant, le sage et vertueux d'*Alembert*, qui nous a fourni les articles ci-dessus, était secrétaire perpétuel de l'Académie des Sciences de Paris, et auteur de 10 à 12 vol. in-8o, concernant les hautes sciences, la philosophie et la littérature; c'était le fils naturel et délaissé d'un personnage éminent, qui voulut le reconnaître quand il fut célèbre; mais le savant n'accepta pas. Sachant se borner au médiocre produit de ses ouvrages, il garda auprès de lui la pauvre nourrice qui l'avait adopté, et aidait encore de services pécuniaires de jeunes étudiants. En correspondance avec CATHERINE LA GRANDE de Russie, et avec le grand FRÉDÉRIC de Prusse, ami de *Voltaire*, de *Diderot* et autres illustres contemporains, il refusa 60 mille livres de rente pour l'instruction du prince impérial, et la place de président perpétuel de l'Académie de Berlin, à laquelle FRÉDÉRIC ne voulut nommer personne du vivant de d'*Alembert*. Singulier phénomène historique! Deux philosophes sur le trône à la même époque, voulant enrichir un troisième philosophe pauvre, et qui préfère la médiocrité, l'étude et l'indépendance!!... Cependant un savant si respectable, d'un caractère aimable et gai du reste, dont la postérité honorera constamment la mémoire, ne serait, de nos jours, pour certaines gens, qu'une *vieille perruque*, une *momie*, tant ces gens-là sont devenus appréciateurs des hommes et des choses!

qui ne **contredit** nullement les axiomes de la science dont nous nous occupons uniquement ici.

879. Les bornes des effets de la mécanique ne s'arrêtent pas seulement au problème idéal d'*Archimède*, elles sont fixées plus près de nous, par les dépenses qui, dans toute machine, doivent être inférieures aux produits demandés, pour procurer quelque avantage. La puissance humaine et la force des animaux, appliquées comme motrices dans les machines, ne peuvent dépasser un certain terme, et la vitesse y est limitée comme l'intensité. En augmentant, par exemple, le levier moteur, on se trouve nécessairement borné par l'espace à parcourir, et, sinon par les limites de la localité, au moins par le temps nécessaire pour parcourir cet espace, et ce temps est aussi une *valeur*, comme on l'a déjà dit. La vitesse d'un cours d'eau, celle du vent, etc., ne peuvent non plus dépasser certains degrés; les dimensions des machines sont aussi bornées, autrement elles manqueraient de solidité relative, ou deviendraient trop dispendieuses; l'emploi si intense de la *vapeur* est également limité par la dépense et par les accidents à redouter. Entre diverses machines, soit fortes, soit délicates, pour obtenir un effet voulu, la meilleure est celle qui réunit le plus de simplicité et de solidité à la plus grande économie de temps, de force et de réparation, relativement à son produit; il en faut donc savoir calculer la puissance et l'effet pour comparer la valeur des moyens employés avec celle de ce produit. Et comme il y a dans toutes des leviers, des plans inclinés, des puissances et des résistances, il est indispensable de se familiariser avec les moyens d'en calculer les forces (1).

880. Si ce que nous avons dit du levier présentait encore quelques difficultés, on pourrait en tout cas les écarter par la méthode générale qui suit : « Dans tout levier, « quelle que soit son espèce, il faut multiplier la masse motrice, ou la puissance, par la « longueur de son bras de levier, et multiplier de même la résistance par la longueur du « bras de celle-ci, mesurés l'un sur l'autre sur une même échelle; et si les produits de « chaque côté deviennent égaux, il y aura *équilibre*. » Cette règle générale est propre à vérifier le calcul des effets et à en reconnaître l'erreur. En cas de produits inégaux, le côté le plus fort réagira sur l'autre, si la différence suffit à surmonter les obstacles, comme les résistances à vaincre, l'inertie, les frottements, etc. Lorsqu'on a obtenu l'*équilibre*, les forces nécessaires pour le rompre sont faciles à calculer. Si, par exemple, la distance entre A, fig. 12, et C, centre de mouvement, est moitié de la distance CB, et si la masse A est double de la masse B, ces deux masses étant multipliées chacune par leur bras, ou rayon, ou distance du centre C, donneront le même produit, et il y aura *équilibre*, puisque les longueurs des bras seront alors exactement en *raison inverse* des masses. Si l'une des masses est plus forte, ou si son rayon est plus long, son pro-

(1) L'art de se produire, le *savoir-faire*, bien différent du savoir, les circonstances, la protection, le charlatanisme, séduisent et procurent parfois des succès éphémères; mais la science, la théorie, la réflexion et une bonne pratique raisonnée consolident seules de véritables progrès : elles sont puissamment aidées par des connaissances générales et analogues. On doit donc profiter du temps et des occasions pour s'*instruire*.

duit sera plus grand, et son excès réagira contre l'autre masse et la mettra en mouvement. Or, les proportions de l'équilibre étant trouvées, l'intensité de l'action ou du mouvement à produire se détermine aisément, suivant l'effet demandé et la résistance qu'il oppose.

881. Cette méthode simple est toute de pratique, et l'on pourrait s'en servir uniquement; cependant elle n'explique pas en détail les causes et les effets, comme l'analyse donnée précédemment des longueurs des bras du levier que nous avons dû développer d'abord; mais elle est très-bonne comme moyen général et prompt de vérifier toutes les compositions de ce genre.

882. Pour bien saisir l'esprit des propositions, il faut connaître la valeur des *termes;* c'est ce que procurent de bonnes définitions. Le mot *vitesse* exprime dans la science : « une affection du mouvement par laquelle un corps est capable de parcourir un espace « connu, dans un temps donné. » Le *mouvement* a toujours une *vitesse* quelconque. Ces deux mots sont souvent pris comme synonymes, parce que l'un suppose l'autre. La vitesse uniforme fait parcourir à un mobile des espaces égaux en temps égaux. Lorsque le milieu ou fluide traversé ne résiste pas sensiblement, en proportion des forces ou poids des corps, on n'y a égard qu'en réservant un peu plus d'avantage à la force motrice; dans certains cas, le grand volume ou l'extrême vitesse du corps en mouvement éprouve une résistance et un retard plus sensibles de la part de l'air, ou de tout autre fluide ambiant, qu'il faut porter en ligne de compte.

883. La vitesse peut être *absolue* ou *relative;* nous venons de parler de la vitesse *absolue*. La vitesse *relative* se mesure par la quantité d'espace qu'un corps en mouvement parcourt de plus ou de moins qu'un autre corps en mouvement, et pendant le même temps.

884. La vitesse non uniforme ou inégale est celle qui éprouve de l'augmentation ou de la diminution pendant le mouvement, et ses variétés sont en proportion des causes qui les produisent. On a vu que, dans le levier de la figure 12, les vitesses avec lesquelles les deux corps se meuvent, ou tendent à se mouvoir, sont comme les arcs parcourus dans le même temps, ou comme les rayons de ces arcs : la force du choc que l'un de ces corps en mouvement produirait contre un obstacle rencontré serait égale au produit de la masse de ce corps, multipliée par sa vitesse ou par l'espace parcouru, en considérant ce corps séparément de l'autre; mais à cause de l'inflexibilité, supposée complète, du levier qui lie les deux corps, l'obstacle rencontré par un seul côté subirait une force double, puisque les deux masses agiraient à la fois dans le même sens, et chacune avec une force égale à celle de l'autre, vu la compensation de la quantité des masses multipliées par les longueurs des rayons, ou par les vitesses, ou par les arcs parcourus, ce qui revient au même, et, vu l'inflexibilité supposée du levier, transmettant alors à la fois la force des deux masses.

885. Nous n'avons considéré jusqu'ici le levier que comme formé d'une règle *virtuelle*, imaginaire, droite et inflexible, dont nous avons même négligé la pesanteur inévitable dans l'exécution matérielle; mais dans les machines, 1° les bras du levier sont souvent

courbes ou contournés, suivant la place disponible et en raison du point où ils doivent aboutir; or, dans ce cas, la longueur et la direction apparente des bras ne sont pas celles du principe qu'on y doit observer pour en faire le calcul; 2° il y a aussi des leviers dits *angulaires*, dont les bras forment entre eux un angle ayant son sommet au centre du mouvement; 3° il faut considérer la direction oblique de la puissance ou de la résistance sur les bras du levier : cette direction décompose la force et la réduit; 4° la direction de l'effort total ou de la pression sur le point d'appui doit souvent être connue, relativement à l'usure des pivots ou des trous du *centre* de mouvement, et à son déplacement successif; 5° la puissance ou la résistance peuvent provenir de plusieurs forces *conspirantes* et de divers degrés, dont quelques-unes même peuvent être en opposition; ces forces doivent souvent être converties en une force unique et moyenne, nommée la *résultante*. Souvent aussi une seule force doit être décomposée proportionnellement aux directions exigées par la disposition des parties, et ces deux cas donnent lieu à ce qu'on appelle *composition* et *décomposition*, ou *résolution des forces;* 6° nul mouvement n'est communiqué sans contact et appui direct, ou glissement, ou au moins *développement*, d'où résultent ou l'inertie dans le choc, ou des réactions et rebattements par élasticité, ou des frottements, ou des adhérences variables et sensibles dans les actions peu intenses, enfin des obstacles quelconques à analyser et retrancher du produit des forces.

886. Il y a donc des observations à faire sur ces divers cas; mais, pour reposer un moment le lecteur, nous allons faire sur un rouage de Pendule (ou d'une Horloge quelconque) l'application détaillée du calcul direct du levier droit et de première espèce, comme moyen de connaître la force transmise dans une suite d'engrenages, soit d'une roue à l'autre, soit de la première à la dernière. Si l'opération que nous adoptons ici, de préférence à diverses autres, est un peu longue, l'esprit en est plus facile à saisir. Nous indiquerons aussi d'autres méthodes plus promptes, mais moins explicatives.

887. Le rouage de la figure 2 est, à très-peu près, celui de la première Pendule à secondes de *Berthoud*, dont le calibre est tracé dans notre planche XVIII; il est un peu corrigé dans sa Pendule d'équation que nous avons donnée postérieurement : nous avons dit *à très-peu près*, parce que *Berthoud* n'a donné que des diamètres totaux, et que nous suivons ici le principe géométrique des diamètres primitifs, principe très-important pour a juste grosseur des pignons servant de base à notre calcul, ainsi que pour l'exacte grandeur des autres mobiles. Les grosseurs de pignons de *Berthoud* sont prises sur les dents des roues, en raison des nombres, suivant la méthode défectueuse de son temps, encore trop suivie aujourd'hui, et que nous ne pouvons pas adopter après l'avoir déjà signalée somme fautive. Cette différence n'influe pas, du reste, sensiblement sur les diminutions générales du calibre. Les mobiles sont placés ici sur une seule ligne droite, quoique disposés autrement dans la cage, ce qui, dans notre calcul, n'a aucune influence sur les produits des forces.

888. Les deux bras du levier de chaque roue se composent, l'un du rayon primitif du pignon, et l'autre du rayon primitif de la roue, montés l'un et l'autre sur la même tige, et nous établirons le rapport de ces deux bras en mesures linéaires avec fractions. La

force motrice est ici en désavantage, puisqu'elle agit sur le bras le plus court, qui est le rayon du pignon, pour transmettre le mouvement par le bras le plus long, qui est le rayon de la roue; il en résulte donc une réduction de la force transmise, mais compensée par la durée de l'effet final, c'est-à-dire par la multiplication des révolutions du dernier mobile, résultat demandé : en sorte que ce qui est perdu en force est récupéré en temps, ou en durée, ou en espace parcouru, ou enfin en révolutions, ce qui revient au même, celles-ci exigeant un temps déterminé et connu d'après le mécanisme de l'échappement. La compensation en ce sens a toujours lieu quand les roues mènent les pignons. Le contraire s'obtient quand les pignons mènent les roues; la puissance agit dans ce dernier cas sur le bras le plus long du levier, pour transmettre la force par le bras le plus court : alors on emploie du temps et de l'espace pour acquérir leur équivalent en force. C'est ainsi que l'on produit la révolution annuelle d'un roue d'*équation* pesante et accompagnée des frottements de son *ellipse*, de son sautoir, etc., au moyen d'engrenages dont les roues sont menées par les pignons; en sorte qu'un pignon de chaussée, premier moteur de ce rouage particulier, faisant, par exemple, 8,760 révolutions par année commune, n'opère qu'une seule révolution d'une roue annuelle, et que la résistance assez considérable de ce mécanisme est presque insensible pour le pignon de chaussée. Un autre effet de ce genre a lieu dans les Montres à masse dites *perpétuelles*, parce qu'elles n'ont besoin que d'être portées pendant un quart d'heure sur deux ou trois jours (suivant la construction) pour que le ressort moteur en soit toujours armé. Or, comme il est rare dans l'usage habituel de la Montre de la laisser deux ou trois jours de suite au crochet, il s'ensuit que ces Montres peuvent marcher perpétuellement si on le veut, sans être remontées par la clef, et, pour cette même raison, on n'y pratique souvent point de carré de remontoir. Dans ces pièces, une forte masse est suspendue au bout d'un levier horizontal, et est équilibrée dans cette situation par un ressort de petit barillet; elle oscille ainsi naturellement par le moindre mouvement de celui qui la porte; elle remonte peu à peu l'arbre de barillet denté du mouvement, au moyen d'un encliquetage très-léger et d'une suite de plusieurs pignons menant des roues, comme par l'effet très-lent d'une clef de remontoir. Le mouvement est calculé pour marcher naturellement ou deux, ou trois jours, et le ressort est toujours plus armé qu'il ne *défile* par le rouage du mouvement; il est donc presque toujours monté jusqu'en haut quand on porte la Montre : ce remontage mécanique est borné par un arrêt solide aussitôt que le ressort est complétement armé; car, sans cela, la masse agitée obtient tant d'avantage de levier en menant les roues par les pignons, que, si elle n'était pas arrêtée par le *compteur d'arrêt*, elle tordrait et briserait l'arbre de barillet, l'une des plus fortes pièces de la Montre; aussi emploie-t-on plusieurs moyens d'arrêt dans ce cas, et leur disposition doit-elle être sûre et bien entendue : car, si l'arrêt manque, il en résulte de grands ravages dans le mécanisme, ce qui, malgré les précautions connues, n'arrive encore que trop souvent. Les Montres de ce genre étaient jadis très-épaisses; mais, lorsque nous les décrirons, nous en donnerons un calibre particulier inédit, à la fois solide et d'une épaisseur moyenne, que l'on pourrait même dire *plat* comparativement aux précédentes dimensions connues. Le mécanisme

du *cric*, instrument grossier, mais puissant, est établi sur le même principe; une manivelle y conduit un pignon menant une roue dont le pignon mène une crémaillère droite et dentée, armée à son extrémité de crochets qui soulèvent les masses, et le tout est retenu à volonté par un encliquetage.

889. Dans le rouage de notre Pendule, fig. 11, pl. XXII, le cylindre où s'enroule la corde du poids est supposé avoir pour rayon les deux tiers du rayon primitif de sa roue. La figure le représente un peu plus fort; mais c'est au texte qu'il faut s'en rapporter. Le tout est tracé d'après une échelle *sous double* ou moitié de la grandeur réelle. La corde du poids est simple et non mouflée, ce qui ne change pas le calcul, mais la descente du poids. Nous allons récapituler les dimensions de ce rouage.

890. La première roue de *cylindre* A porte 90 dents et 15 lig. 1/2 de rayon primitif; elle mène le premier pignon en B de 14 ailes, lequel, d'après les nombres, fait 6 tours et 3/7 pour un tour de la roue A de cylindre. Ce pignon en B a 2 lig. 1/3 de rayon primitif. On sait que l'*excédant* de ces mobiles est en dehors du *primitif*.

891. La deuxième roue suivante B, dite de *temps* (et nommée grande moyenne dans *F. Berthoud*), a aussi 90 dents et 11 lignes de rayon primitif; elle mène le second pignon en C de 10 ailes, lequel fait 9 tours pour un de la roue B : ce pignon en C a 1 ligne 2/9 de rayon primitif.

892. La troisième roue C, dite (vraiment) *grande moyenne* ou de *minutes*, a 80 dents et 10 lignes de rayon primitif; elle mène le troisième pignon en D de 10 ailes qui fait 8 tours pour un de la roue C : ce pignon en D a 1 ligne 1/4 de rayon primitif.

893. La quatrième roue D, dite *petite moyenne*, a 75 dents et 9 lignes du rayon primitif; elle mène le pignon en E, d'*échappement*, de 10 ailes, faisant 7 tours et 1/2 pour un de la roue D : ce pignon E a 1 ligne et 1/2 de rayon primitif.

894. La cinquième roue E, qui est celle d'échappement, a 8 lignes 3/8 de rayon; ici les deux rayons primitif et total se confondent en un seul, parce que les dents y travaillent par leur extrémité et n'ont point d'*excédant*, ou vulgairement d'*arrondi*.

895. Dans la figure 11, les couteaux sur le tranchant desquels les leviers sont supposés appuyer se trouvent alternativement en dessous et en dessus, suivant le sens de l'appui; leur angle aigu doit correspondre au centre des axes et des pivots. La ligne la plus fine, intermédiaire entre les diverses élévations des leviers, est la véritable *ligne de foi* sur laquelle les angles des couteaux sont censés aboutir, en sorte que les centres des roues sont supposés exactement sur cette *ligne de foi*. Les leviers sont supposés s'atteindre juste par leurs extrémités, pour la rigueur des mesures, bien qu'un léger croisement ou empiétement de ces extrémités soit nécessaire dans l'exécution pour l'action matérielle de tels leviers; mais il ne s'agit ici que du principe.

896. Il résulte du rayon primitif de la roue A de cylindre que, pour en représenter les deux tiers, le rayon du cylindre est censé avoir 10 lignes 1/3, mesurées du centre de la roue jusqu'au milieu de l'épaisseur de la corde. On sait que le cylindre est considéré comme faisant corps avec sa roue, au moyen de l'encliquetage arc-boutant et entraînant la roue dans le sens du tirage du poids.

897. Le rayon *pa* du cylindre portant le poids moteur P et le rayon *ax* de la roue forme, comme on le voit, un levier droit de première espèce, ayant son point d'appui au centre du pivot supposé en *a* et représenté par l'angle central du couteau. Le bras le plus court *pa* est donc égal aux deux tiers de la longueur *ax*, bras plus long de la roue. Ces deux bras sont entre eux comme 2 : (*est à*) 3 ; et, d'aprés les principes de ce levier, les forces aux extrémités doivent être *inversement* dans le même rapport, pour se faire équilibre ; c'est-à-dire que dans ce cas, la force ou puissance P étant 3, la résistance doit être 2.

898. Si, en place d'une résistance 2, il se trouve à l'extrémité *x* un autre bras *x* du levier mobile *x*B*y*, il est clair que celui-ci ne fera équilibre en *x* qu'en résistant comme 2, et que, par suite, il recevra une pression comme 2. (*La figure de* P *est ici réduite.*)

899. Ainsi le poids moteur P, étant supposé de 12 livres (quantité ordinaire à l'époque de *Berthoud*, mais beaucoup moindre depuis) et tirant sur le bout *p* du bras *pa*, ne produira que 8 livres de force à l'extrémité *x* du bras *ax*, point où, comme on l'a vu, 8 livres de résistance par le bout du levier suivant feront équilibre avec 12 livres de poids ; par conséquent, ce même bout du levier suivant ne recevra qu'une pression ou force de 8 livres. La même application reste à faire aux autres mobiles ; mais il faut auparavant réduire 8 livres en grains pour en faciliter les divisions successives.

900. 8 livres = *égalent* 128 onces, = *qui égalent* 1024 gros, = *ou* 73,728 grains, force actuellement appliquée en *x* au bout du rayon primitif du pignon B, porté par l'axe de la roue de *temps*, ainsi qu'on l'a vu ci-dessus.

901. Nous avons au rayon primitif du pignon B, 2 lig. 1/3, et au rayon primitif de la roue B, portée par le même axe, 11 lig. de rayon primitif. Ces deux longueurs forment les deux bras du second levier appuyé sur le centre de l'axe en B.

902. Il faut d'abord connaître le rapport qu'ont entre eux les deux bras de ce second levier ; et comme l'un d'eux est accompagné d'une fraction, on multipliera chacune des deux longueurs par le dénominateur de cette fraction, qui est 3, pour les rendre comparables, sans rien changer à la valeur de chacune.

903. En multipliant 2 lig. par 1/3, on a 6 tiers de ligne, plus le numérateur 1 de la fraction à ajouter ; total 7 tiers pour le bras ou rayon du pignon. 11, multipliés aussi par 1/3, donnent 33 tiers pour le bras ou rayon de la roue B. Ainsi, par la règle du rapport inverse, la puissance sur le bras du pignon sera 33, tandis que la force transmise à l'extrémité du rayon de la roue ne sera que 7.

904. Divisant donc la puissance en *x*, qui est de 2 livres, ou 73,728 grains, par 33, on aura au quotient 2,234, qui représente 1/33e du rayon B*y* de la roue. Et multipliant ce quotient par 7, on aura un produit de 15,638 grains, qui, par l'effet inverse, seront, au bout du rayon de la roue B, c'est-à-dire en *y*, la force *équilibrante* de la puissance 73,728 grains, agissant primitivement sur l'extrémité *x* du rayon du premier pignon B, et se réduiront, par le désavantage du levier, à la pression de 15,638 grains exercée en *y* sur le bras le plus court *y*C du levier suivant.

905. En répétant la même opération sur le second pignon et sur sa roue de minutes ou grande moyenne C, l'on ne trouvera plus à sa circonférence primitive que 1911 grains

906. Une opération semblable sur le troisième pignon et sur la roue D ne produira sur le pignon E que la pression de 265 grains et demi.

907. Enfin, le quatrième pignon E d'échappement a pour rayon primitif 1 lig. 1/5, et la roue E d'échappement a 8 lig. 1/3 de rayon. Pour établir leur rapport en nombres *ronds*, il faut cette fois les multiplier tous deux successivement par chaque dénominateur des deux fractions, en ajoutant à chacun le chiffre numérateur de sa fraction. Cette petite différence d'avec les opérations précédentes nous engage à détailler encore celle-ci. Ainsi donc, 1 lig. 1/5, multiplié par 5, donnera 6/5 de ligne, et 8 lig. 3/8, multiplié aussi par 5, donnera 41/5, plus 7/8 de 5[e]. On multipliera encore ces deux produits par 8; alors, en place du premier produit, qui était 6/5, on aura 48/40[es]; et en place du second produit, qui était 41/5 et 7/8, on aura 335/40[es]. Ces deux numérateurs 48 et 335 (les unités des dénominateurs étant les mêmes) seront entre eux dans le même rapport que 1 lig. 1/5 à 8 lig. 3/8; mais nous prendrons 48 et 336 pour faciliter leur réduction à de moindres termes : elle produira le rapport de 1 à 7, en termes réduits le plus possible.

908. On divisera donc, comme précédemment, 265 grains (en négligeant le demi-gr.) par 7, et l'on aura au quotient 37, plus 6/7 qu'il faudra multiplier par 1; le produit sera nécessairement la somme elle-même, 37 6/7, ou plus simplement 38 grains, très-approximativement, qui seront la force transmise à la circonférence de la roue d'échappement. Cette opération est conforme à la première, sauf qu'elle a lieu sur deux nombres fractionnaires; mais on peut opérer encore plus simplement, comme il suit.

909. 1 lig. 1/5 et 8 lig. 3/8 peuvent être convertis chacun en unités de leur fraction, et former le 6/5 pour pignon et 67/8 pour la roue. Ces deux nouvelles fractions, réduites au même dénominateur, deviendront 48/40 pour le pignon et 335/40 pour la roue. La seule différence entre les numérateurs étant celle des bras du levier, on prendra comme ci-dessus les nombres 48 et 336, comme approximation, qui se réduisent de même aux deux termes 1 et 7, que l'on peut adopter sans erreur sensible, la négligence de quelques fractions minimes (à la fin d'une opération) étant trop peu importante pour allonger le calcul en y portant plus de rigueur. En achevant l'opération comme ci-dessus, le poids de 38 grains en p', même figure 11, représentera la force de la roue d'échappement au point F, ou à tout autre point de sa circonférence (1).

910. C'est ainsi que la réduction théorique et très-approximative à 38 grains, ou au 1940[e] de la force primitive de 73,728 grains, est produite par la différence donnée des

(1) Une autre méthode de trouver la réduction de la force ainsi transmise à la dernière roue consiste à multiplier successivement les uns par les autres les rapports entre les deux bras de chacun des leviers, et à prendre le produit pour diviseur de la somme de la première force motrice; le quotient sera aussi la force à la circonférence de la dernière roue : cette méthode, donnant également un quotient de 38 grains, pourrait servir d'une sorte de preuve arithmétique pour la première opération que nous avons détaillée et choisie comme la plus explicative.

Berthoud y emploie le calcul des révolutions, qui arrive à un résultat analogue; mais, pour cette même figure 11, il diffère du nôtre, qui est établi plus régulièrement sur les diamètres primitifs de chaque mobile, dont nous avons changé un peu les dimensions, particulièrement pour les pignons, afin de leur donner une progression décroissante de diamètres un peu mieux suivie, si l'on voulait exécuter ce rouage.

bras inégaux de 4 leviers. Mais aussi les révolutions de la roue d'échappement, ou l'espace parcouru par l'une quelconque de ses dents, sont augmentés d'autant, puisque cette roue fait 1440 tours en 24 heures, tandis que la roue du cylindre n'en fait pas même la moitié d'un, car un tour entier de cette première roue équivaut ici à 52 heures.

911. Mais comme, dans la plupart des machines simples et ordinaires, les frottements sont estimés absorber environ un tiers de la force, terme moyen fort incertain lui-même, et que l'expérience peut seule fixer, vu la variété propre des matières de même nom, l'état des surfaces flottantes, la pesanteur des mobiles, etc., on ne peut guère compter ici que sur environ 25 à 26 grains de force à la roue d'échappement, que l'état des huiles plus ou moins coagulées peut aisément réduire à une vingtaine de grains, ou même à moins. On s'assurerait mieux de la quantité de force transmise en définitive, et déduction faite des divers obstacles ci-dessus, si l'on plaçait dans la cage un levier délicat, convenablement disposé pour faire équilibre à la force motrice restante, prise à l'extrémité d'une dent de la roue d'échappement, bon moyen expérimental d'apprécier au total la perte causée par les frottements, l'inertie des mobiles, la résistance des huiles dans leurs différents états, etc. ; car le calcul théorique par les leviers peut bien être porté à une grande exactitude, en ne négligeant aucune partie des fractions, lorsqu'on a établi primitivement des engrenages aussi fidèles aux principes géométriques qu'une bonne exécution peut le permettre (et nous avons expérimenté nous-même que l'on peut y arriver à un très-haut degré, comme nous le démontrerons); mais les résistances dont nous venons de parler ne peuvent être bien connues que par un moyen analogue à celui de ce levier, qui indiquerait aussi les différences de la force immédiatement après le nettoyage et après un temps de service plus ou moins long.

912. Nous rappellerons néanmoins ici que ce n'est pas tant à réduire la force motrice qu'il faut s'attacher, dans l'Horlogerie, qu'à conserver l'égalité la plus constante dans les frottements, toujours d'ailleurs inévitables. Si l'on ménage trop la force, on tombe dans la dépendance des huiles, dont l'épaississement rend plus sensibles et l'inertie des mobiles, et l'altération des surfaces frottantes; le grand poli de ces parties ne se conserve pas longtemps, et se réduit par le frottement à un adouci très-fin qui change beaucoup moins. On a remarqué aussi qu'une puissance plus forte qu'on ne l'employait autrefois, modérée cependant, est moins assujettie aux divers états de l'huile, aux influences atmosphériques, à l'inertie des mobiles, à l'ébranlement même des édifices, etc.; et l'usage plus fréquent des rubis pour les trous des pivots et pour les parties essentielles de l'échappement nous a appris à augmenter raisonnablement la force, sans inconvénient pour les mobiles qui ne roulent pas sur pierres fines, mais sur des parois métalliques d'une suffisante étendue et bien préparées. Quelques artistes sont même d'avis que les pierres fines ne conviennent pas aux grands frottements des premiers mobiles, vu le défaut d'étendue ou de parallélisme dans les surfaces frottantes qui, s'appuyant fortement sur des points étroits, en écartent l'huile, se touchent ainsi presque à nu, et finissent par se *gripper*.

913. Il est avantageux de donner au cylindre du poids d'une Pendule astronomique

le plus de diamètre que permet l'espace pour la descente de ce poids, et d'établir celle-ci en conséquence. Ce principe est bien opposé à la méthode de quelques constructeurs qui emploient un barillet, ou un cylindre, ou une poulie à pointes d'un très-petit diamètre, avec une roue d'une grandeur insolite. On attribue à cette cause d'inertie la plupart des variations que les pièces de ce genre éprouvent communément. Il en est de même de l'emploi de pignons peu nombrés avec de grandes roues qui le sont beaucoup. Cette disposition augmente très-sensiblement les effets de l'inertie. Quant à la descente du poids, on peut gagner un peu d'espace, lorsque le poids est *mouflé*, en noyant sa poulie dans le haut de ce poids, qui peut être entaillé pour cet effet, avec le moins de vide et de perte de matière. Les poulies qui portent un axe avec deux pivots éloignés entre eux, ce qui est très-praticable dans cet emboîtement de la poulie, sont beaucoup plus libres et mieux garanties contre la tendance au dévers, qui augmente beaucoup le frottement.

914. A cette occasion de l'effet du poids sur le cylindre, puisque nous avons abordé en passant cette matière qui ne devait pas être traitée ici, parce qu'elle le sera plus amplement et plus convenablement ailleurs, nous indiquerons provisoirement la première idée d'une disposition avantageuse du poids, due à notre célèbre Julien, et dont on néglige peut-être trop généralement l'application dans les régulateurs. Voici le cas dont il s'agit. Si, dans notre même figure 11, on place le poids moteur entre le centre a du cylindre et l'extrémité x du bras suivant de levier en xB, on chargera d'autant moins le centre a, sans augmenter la charge sur B. Car la figure du même poids pointillée en P', étant par exemple appliquée en x, en supposant un moment le diamètre du cylindre égal à celui primitif de la roue A, P' appuierait uniquement sur le pignon en x du bras xB, et nullement sur le centre a, qui ne serait chargé que de la pesanteur propre de son mobile, et éprouverait d'autant moins de frottement. (Mais, comme notre figure représente ici le rouage vu à l'arrière du cadran, et que la roue de minutes et celle de secondes y tournent à gauche, afin que la marche des aiguilles soit à droite sur le cadran, il faudrait, pour la disposition du poids pointillé, considérer la même figure du rouage comme vue du côté du cadran, afin que la roue C et les aiguilles eussent toujours leur progression à droite, ce qui ne présente aucun inconvénient.) En effet, la pression du poids réel P, placé comme nous l'avons calculé d'abord, est déjà de 12 livres sur l'appui a; il y a de plus la résistance x de 8 livres, total 20 livres portées par l'axe en a, suivant l'article (849) où nous avons dit que le point d'appui est, en principe, nécessairement chargé à la fois du poids de la puissance et de celui du contre-poids opposé qui lui fait équilibre, ni plus ni moins. Donc, si le poids pointillé était placé, non en x, grosseur peu praticable du cylindre, mais seulement sur le diamètre tracé de notre cylindre actuel, passant sur le bras du levier entre a et x, il est évident, 1° que l'espèce du levier serait changée, et qu'il deviendrait celui de troisième espèce, la puissance étant alors entre le point d'appui et la résistance; 2° que, par suite, ce même poids de 12 livres, supposé alors tirer aux deux tiers du bras ax et près de x, appuierait également de 8 livres sur xB, comme il le fait actuellement, mais seulement de 4 livres sur a, ce qui n'est que le cinquième des 20 livres que a

supporte dans l'état actuel : tant il est utile de distinguer l'espèce, et de faire le calcul des leviers, comme d'en choisir la meilleure application.

915. Or, c'est de cette disposition, qui fut établie par *Julien* dans son Horloge *horizontale*, la première de ce genre, que l'on peut tirer avantage dans les Horloges astronomiques et autres, où cette attention est négligée, et où il suffirait de placer seulement l'axe du *cylindre* et celui de la roue de *temps* sur une même ligne horizontale, en laissant la grande moyenne ou roue de minutes au-dessus et au milieu des platines, avec le reste du rouage à l'ordinaire. Nous nous bornerons ici à cette seule observation anticipée, que nous reprendrons aux articles des régulateurs et des grosses Horloges publiques, en examinant les dispositions qu'elle peut nécessiter.

Du levier dont les bras sont courbes ou angulaires.

916. On trouve souvent dans les machines, ou bien l'on est obligé de donner dans celles que l'on compose, une courbure quelconque aux bras du levier, ce qui paraît en augmenter la longueur, comme dans le bras BC, tiré par la puissance P′, fig. 10. Cette disposition n'est toutefois praticable que pour une étendue très-bornée du mouvement des bras ; autrement, elle serait sensiblement désavantageuse, à moins que la courbe BC ne vînt rejoindre la ligne *virtuelle* en (") et que le tirage de P′ ne fût en ce même point. La longueur d'un bras courbe n'est du reste qu'apparente, et c'est sa direction perpendiculaire à celle de la force qui détermine la vraie longueur du bras virtuel, comme étant la véritable expression géométrique de sa quantité d'action. Par exemple, si la force en E tirant sur le bras C est une tangente à ce point C de l'arc *ab*, c'est-à-dire perpendiculaire au rayon droit pointillé de B en C ; alors le bras BC, représenté en principe par ce rayon droit, sera d'une longueur et puissance double du bras AB ; et, pour que C fasse équilibre en A au poids P, il suffira en E, et en conservant la direction EC, d'une force de traction moitié de celle P, puisque BC est double de BA, et que les forces sont en raison *inverse* des longueurs.

917. Mais si la force qui agit sur C est en P′, sa direction à l'égard du bras C étant DC, il en résulte que la ligne pointillée BD est le vrai bras virtuel qui remplace géométriquement celui apparent BC, BD étant la ligne la plus courte et la seule perpendiculaire possible de B sur DC, suivant l'article (828) où il est dit que : « La longueur vraie ou *virtuelle* d'un bras de levier se mesure par une ligne droite perpendiculaire à celle de la « direction de la force. » Par conséquent, ici, le bras virtuel BD étant égal en longueur au bras BA, le poids P ne pourra être équilibré que par un poids semblable P′, c'est-à-dire par une force double de celle que nous avions trouvée en E. Cette règle s'applique également aux trois espèces de leviers, suivant les rapports de longueur des bras, ou de distance entre les points d'action et le point d'appui.

918. Ainsi, dans cette même figure 10, la disposition du bras de levier BC tiré obliquement par P′ est désavantageuse et même tout à fait vicieuse, et nous ne la citons que comme un exemple de ce que l'on doit éviter. En effet, CB ne pourrait se mouvoir sur

le centre B que suivant *ab*, et par conséquent résisterait d'autant plus à P', que la direction de la force arrivant en D*b* serait plus oblique au rayon droit de B en *b;* il faudrait même une poulie placée en D pour maintenir le point de départ de cette direction ; et le bras courbe continuant à s'abaisser au delà de *b*, en décomposant ainsi de plus en plus la force, lorsque C serait arrivé en (") au niveau horizontal de la poulie, la force P' sur C deviendrait absolument nulle. On en doit conclure que certains *renvois* de mouvement de ce genre, dits *en équerre*, quoique leurs points d'action ne parcourent pas un grand arc de cercle, transmettent une force très-inégale, vu que la résistance et la puissance s'y décomposent. Il faudrait que les extrémités de ces *équerres* fussent pourvues de portions de cercle ou de poulie, avec gorge et chaîne de développement, pour y conserver une action sensiblement uniforme, comme on le pratique en effet dans plusieurs machines, afin de produire sous ce rapport l'effet des engrenages; car ceux-ci, bien exécutés, suivant leur principe géométrique, conservent une action parfaitement uniforme; et quoique leurs dents semblent autant de leviers détachés qui paraissent se succéder à une distance donnée, comme celle de chaque dent, néanmoins la courbe voulue de leur excédant conserve pendant toute la menée, jusqu'à l'arrivée de la dent suivante, la même puissance qu'au premier moment de son contact : cette uniformité de force se démontre par les rapports égaux des divers leviers que produit une courbe déterminée pendant la menée de chaque dent, ainsi qu'on le verra à l'article des Engrenages ; c'est pourquoi nous avons dit (834) que « la succession des leviers (en mêmes rapports) y est « immédiate et sans intervalle appréciable. »

919. Lors donc que, par l'action continue des forces accompagnées de mouvement, les bras du levier changent de direction, le levier *virtuel* change aussi de longueur s'il ne porte pas une portion de cercle, et l'équilibre se détruit, ou le degré de prépondérance varie avec son mouvement : on y a peu d'égard lorsque l'arc parcouru est très-borné, parce que la puissance y est ordinairement accompagnée d'une certaine surabondance de force ; mais, lorsqu'il convient de ménager celle-ci, on n'y parvient, comme il a été dit ci-dessus, que par ces portions de cercle qui conservent le même point de concours du bras virtuel ou perpendiculaire à la direction de la force, et par conséquent la même distance du point d'action à celui de l'appui. Si, dans le cas de mouvement, par la prédomination du point E, fig. 10, l'extrémité A et le poids P sont déplacés et forcés de s'élever, il est clair alors que C s'inclinera vers *b ;* mais, au moyen d'une portion matérielle de cercle en *ab*, ajoutée au bras C et ayant B pour centre, laquelle permet le développement ou l'enroulement (suivant le besoin) d'une corde ou d'une chaîne, ou l'engrenage d'une crémaillère dentée, le point de contact sera toujours au point C, suivant le bras virtuel ou rayon droit de B à C, qui sera tiré en *tangente* au même point, et restera de même longueur, quoique le bras BC soit porté en *b*. La même application d'une portion de cercle en A, et qui aura son centre en B, sera également nécessaire pour conserver la même intensité de force du poids P. Ces arcs de cercle ne s'appliquent que dans les mouvements bornés de *va-et-vient*, comme on l'a déjà observé, et leur portion de cercle est proportionnée à cette étendue de mouvement ; mais si le mouvement s'étend jusqu'à ce

que le bras de levier parcoure un cercle entier, ou fasse même plusieurs révolutions, on y emploie des cylindres portant le nombre nécessaire de tours de corde, ou des poulies avec cordes, sangles ou courrois dites *sans fin*, ou des engrenages, seuls moyens qui permettent un mouvement continu. On a appliqué aussi avec succès, dans les machines volumineuses, des rouleaux de bois sans dentures, dont les jantes étaient formées en bois de bout rapporté, et s'entraînaient par le seul contact pressé de l'extrémité de leurs fibres perpendiculaires aux circonférences; mais ce moyen suppose une forte pression : ce sont là, du reste, les circonstances primitives adoptées dans nos calculs.

920. La figure 8 offre l'exemple de deux forces agissant obliquement sur les bras AF et FB d'un levier AB, et il est évident, même au premier coup d'œil, que ces directions diminuent l'intensité d'action des deux forces P et *p*, dont l'inclinaison est fixée par des poulies de déviation en RA et en SB. Nous n'avons plus besoin d'avertir que de telles poulies, toutes les fois que nous en supposons, doivent être considérées comme parfaitement libres, et en faisant abstraction de leur frottement. Le moyen le plus simple et le plus direct de se rendre un compte exact de la diminution de ces forces par leur direction oblique, comme de les comparer entre elles, est précisément celui que nous venons d'indiquer, c'est-à-dire de prolonger indéfiniment la ligne droite de direction de chaque force au delà du point d'action, en sorte que l'on puisse chercher sur chaque ligne le lieu d'où une perpendiculaire peut passer sur le point d'appui; c'est cette perpendiculaire qui devient, comme il a été dit ci-dessus, le véritable bras géométrique, le bras *virtuel* de chaque côté du levier; c'est ce que représente cette figure 8; la ligne de force du poids P, dirigée par sa poulie en RA, où elle agit obliquement sur le bras apparent AF, doit être prolongée au delà de C, jusqu'à ce que CF, perpendiculaire sur AC, puisse passer par le point d'appui F; alors la longueur CF est le véritable rayon ou bras *virtuel* de ce côté du levier AF. (*Les forces* P *et p sont ici des poids égaux.*)

921. De même, la direction SB, occasionnée par la poulie du poids *p*, étant prolongée indéfiniment suivant la droite BD, jusqu'à ce qu'une perpendiculaire tirée sur le point convenable de cette droite puisse passer par le centre ou point d'appui F, on aura FD pour longueur du bras *virtuel*, remplaçant géométriquement le bras apparent FB. La différence de longueur entre FC et FD indiquera directement la différence d'intensité produite sur les deux bras inégaux du levier AB par les deux forces égales P et *p*, à raison de leur inclinaison différente sur ces bras; et si l'on compare la longueur FD à celle FB, ainsi que la longueur FC à celle FA, on aura exactement la perte de force de chaque poids à raison de la direction oblique de cette force sur son bras de levier. (Il est presque inutile d'ajouter que le rapport apparent entre les bras FB et FA des lignes noires de la figure indique assez que les forces P et *p* auraient eu plus d'intensité, comme aussi de différence d'effet, si elles avaient tiré verticalement au-dessous de A et de B, au lieu d'avoir leur direction oblique par l'effet de leurs poulies de déviation; car alors, leur action étant perpendiculaire au levier, la différence de leur puissance aurait été simplement en raison inverse de ces bras matériels de levier, comme on

l'a vu pour le levier droit de première espèce.) Cette méthode est applicable, du reste, aux trois espèces de leviers lorsque les puissances ou les résistances sont obliques, puisqu'il suffit dans tous les cas d'établir le véritable bras *virtuel* d'action pour déterminer les véritables distances et longueurs géométriques des bras, lesquelles représentent les puissances ou les forces.

922. Le *levier angulaire* de la figure 9 peut avoir ses bras égaux ou non en longueur, implantés sur un même axe qui ne serait vu ici que par le bout; il est supposé avoir son centre au sommet de l'angle du levier ou du couteau qui représente le point d'appui, quoique cette disposition ne puisse avoir lieu dans l'exécution. Les bras peuvent former un angle quelconque, comme B*h* avec FA, mais le principe y est toujours le même que par le levier en ligne droite. Par leur position, les bras angulaires du levier peuvent agir dans un même plan, ou dans deux plans différents, mais parallèles. Les rapports entre les bras y sont établis comme dans le levier droit de première espèce; si ces bras ne sont pas dans un même plan, cela n'y change rien, comme à ceux que forment une aile de pignon d'une part, avec, de l'autre part, le rayon de la roue portée sur le même axe, lesquels, étant souvent chacun à une extrémité de leur tige, ont aussi leurs leviers dans des plans différents de hauteur, mais parallèles entre eux. Ici, le centre d'une telle roue serait supposé au sommet de l'angle formé vers *h* par B*h* et FA; s'il y avait engrenage en A avec un autre mobile, le plus grand bras du levier, celui de la roue, agirait en A sur l'aile ou la dent de cet autre mobile, tandis que le levier, plus court de moitié, celui du pignon en *h*B, recevrait en B une impulsion quelconque : ces deux bras formeraient donc entre eux l'angle BFA, au lieu d'être sur une même ligne comme les leviers du rouage dont nous avons calculé la force transmise. On conçoit aisément, à l'inspection de cette figure, et d'après tout ce qui a été dit à ce sujet, que, le bras AF étant ici d'une longueur double du bras BF, un poids quelconque *p*, tirant sur A par la direction RA occasionnée par la poulie de déviation R, ferait également équilibre avec un poids d'une masse double, supposée en P, puisque les forces seraient en rapport inverse des bras de ce levier angulaire; et, de même, si la force horizontale RA se trouvait descendue à la hauteur où le cercle pointillé *ace* rencontre le bras FA, les deux bras étant ainsi rendus égaux, deux poids égaux s'y feraient alors équilibre. (*Les bras* virtuels *sont conçus perpendiculaires à l'axe.*)

923. Mais ce n'est pas seulement ces longueurs de bras qu'il faut observer dans les leviers, lorsque les machines sont sujettes à une action continue, il faut souvent aussi faire attention à la direction de l'effort sur le point d'appui. Ici l'angle du couteau d'appui est supposé en opposition avec le sommet de l'angle du levier angulaire, ce qui ne peut subsister en exécution: il y faudrait au moins une gouttière comme à la suspension à couteau du pendule, et dans le cas seulement d'un mouvement oscillatoire peu étendu. Mais, pour un mouvement continu, on sait qu'il y faut des pivots ronds d'un axe roulant dans des trous de même forme, ou un trou rond à l'angle du levier qui roule sur une broche ou axe quelconque; or le frottement continuel des pivots et des trous, produisant de l'usure, fait changer au bout d'un certain temps la distance du point d'appui

aux deux autres points d'action des forces, et il est souvent utile de prévoir suivant quelle direction a lieu la pression du centre, et l'usure ou diminution des parties qui éprouvent le plus de frottement. La portion de cercle et les rayons pointillés de cette figure 9 indiquent cette observation : Si, par exemple, les deux bras sont égaux, comme dans la dernière supposition que nous avons faite, la direction de la pression sur l'appui sera suivant la ligne *cd* qui est aussi celle du milieu du couteau supposé. On doute si, le bras FA étant double de FB, comme dans la figure, cette pression serait en *ab*, en divisant l'arc en deux parties inégales qui auraient entre elles le même rapport de 1 à 2 que les bras ; ou si, au contraire, le bras AF n'étant que moitié de FB, la direction sur l'appui serait en *ef;* enfin si, FA étant seule d'une longueur presque infinie, supposée sans pesanteur propre, la direction sur l'appui serait presque suivant la direction horizontale de G, de même que si, FB étant seule d'une longueur semblable, presque tout l'effort se porterait dans la direction perpendiculaire de *g*, c'est-à-dire proportionnellement vers la direction opposée au bras le plus court, si celui-ci charge plus le point d'appui ? On déterminerait peut-être cette direction par le *parallélogramme des forces*. V. plus loin *Composition de la force*. (*C'est un petit problème à résoudre pour exercer les mécaniciens.*)

924. Ayant pris l'équilibre pour moyen de comparaison des forces mécaniques, suivant *d'Alembert* et autres savants géomètres, et puisé avec le premier nos exemples dans les effets plus connus de la balance commune à bras *égaux*, avec deux bassins de même poids, nous terminerons enfin ces articles du levier par l'examen de la *balance romaine*, qui offre encore une autre application du levier de première espèce, avec des bras *inégaux*. Cette construction ingénieuse a pris son nom de l'usage qu'en faisaient les anciens Romains, qui l'ont peut-être reçue de quelque autre peuple plus versé dans les arts mécaniques. Une telle disposition a l'avantage de n'employer qu'un seul et même contre-poids pour équilibrer et comparer des masses de quantités diverses ; mais, comme il arrive souvent, ce qui est obtenu ici dans ce sens est perdu dans un autre : car si la *romaine* dispense de la série nombreuse des poids nécessaires pour la balance commune, elle ne présente ni autant de sensibilité, ni autant de subdivisions faciles, ni une précision aussi évidente et perceptible à la première vue pour les divisions fractionnaires.

925. La figure 7 offre les dispositions principales et essentielles de la *balance romaine*, composée d'un levier suspendu sur l'appui commun, non par son milieu comme dans l'autre balance, mais plus ou moins près de l'une de ses extrémités, et équilibré lui-même séparément par la seule différence des masses ou portions de matière qui en forment les deux bras ; le plus court de ceux-ci, le bras CA, est plus massif que le plus long CB qui va en diminuant vers B. Les *centres de gravité* de ces deux bras doivent en effet être distants de l'angle du couteau ou centre d'appui commun vu dans la première chape DC, en raison inverse de leurs pesanteurs. C'est la première condition de cet instrument ; la seconde est que la deuxième chape H du bassin G, ce bassin lui-même, et les chaînes qui le soutiennent, soient ensemble du

même poids que la troisième chape *cursive* I, qui n'apparaît pas assez volumineuse dans la figure, mais c'est parce qu'on n'en voit pas la largeur (les anneaux des chaînes du bassin peuvent être soudés pour avoir plus de force avec moins de volume). La chape I porte intérieurement un couteau vu pointillé au travers du montant, et qui, par la distance de son angle à celui du point C d'appui commun, comparée à celle de C jusqu'au couteau du bassin, indique le nombre de livres que pèse la matière qui s'y trouve déposée ; celle-ci peut être équilibrée alors par une seule livre du contre-poids P, suspendu au-dessous du couteau *curseur* en I, placé aux distances qui font équilibre à chaque poids divers en L. L'espèce d'étrier indiqué en perspective et pointillé en 8 est destiné à soutenir le bras de la romaine, lorsqu'il n'y a pas équilibre ; une flèche implantée solidement dans le fléau indique l'horizontalité et l'équilibre de celui-ci, lorsqu'elle occupe juste le milieu de l'ouverture supérieure de la chape DE. Un demi-cercle en F, qui ne touche point au fléau, empêche l'écartement de cette chape.

926. La balance *romaine* a l'avantage d'avoir son point d'appui C moins chargé que dans la balance à deux bras égaux, puisque celui de la romaine ne porte souvent que le poids du bassin chargé, et du contre-poids moindre qui lui fait alors équilibre (849 et 860). Elle a encore l'avantage qu'en doublant ou triplant le contre-poids P, on double ou triple le pouvoir équilibrant de l'instrument. Mais il est essentiel de borner ce moyen pour éviter au long bras une flexion qui diminuerait sa sensibilité ; car les angles des trois couteaux doivent être presque sur une seule et même ligne, et en laissant seulement un peu plus de hauteur au couteau de C ; or, cette latitude doit se borner à empêcher la balance d'être *folle*, c'est-à-dire de tomber d'un côté ou de l'autre sans se relever. Il n'y faut donc que la différence nécessaire pour qu'elle puisse osciller lentement un peu au-dessus comme au-dessous d'une moyenne horizontale, car les trois points exactement sur la même ligne la rendraient *folle*.

927. Cependant la *romaine* n'est pas aussi sensible ni aussi sûre pour les petites pesées, que la balance à deux bassins. Car, soit que les divisions se trouvent marquées en dessus par des points creux comme d'ordinaire, soit que les divisions soient seulement latérales, on ne peut juger bien exactement des petites subdivisions. Enfin les balances d'*essai*, qui doivent être très-sensibles, sont toujours à deux bassins et à bras égaux, avec l'avantage de la vérification dont nous avons parlé, c'est-à-dire de changer les poids de bassin. La vérification de la *romaine* serait plus difficile. D'ailleurs cette disposition ne comporte guère que la division des quarts, huitièmes et seizièmes de livre ; les demi-onces y sont déjà difficiles à distinguer, à moins que le fléau, assez long, ne soit divisé que pour de faibles poids, avec un contre-poids d'autant moins lourd ; enfin les petites subdivisions n'y sont toujours appréciées que comme un *à peu près*.

928. On conçoit aisément, d'après cette disposition de la *romaine* et par les principes du levier de première espèce, que le fléau en équilibre par sa propre forme est ici comme sans pesanteur à l'égard du bassin G et de la chape I, et qu'un contre-poids P d'une livre, suspendu au-dessous de cette chape, fera équilibre à un autre poids L aussi d'une livre placé dans le bassin, pourvu que le couteau I et celui de H soient à la même distance du

couteau C, point d'appui commun. Si le couteau curseur I est transporté sur la division 2 supposée en principe, et à part l'inexactitude de la gravure, être à une distance du couteau C double de celle entre les couteaux C et H, alors P fera équilibre à deux livres dans le bassin, en sorte que les autres divisions semblables du long bras, indiqueront autant de livres dans le bassin que ces divisions seront de fois des multiples de la distance CA; on ne doit pas considérer ici les proportions de la gravure qui, comme on l'a dit ailleurs, est rarement exacte sous ce rapport; mais il suffit d'y concevoir ce principe : « que chaque division de livre doit être éloignée d'une autre division voisine de livre, de la distance mathématique entre l'angle du couteau C point d'appui, et celui du couteau A, pour répéter en plus autant de puissances égales à celle actuelle du couteau I, dont la distance à celui C doit être la même que de C en A, pour une livre dans le bassin. » Ainsi, toutes les distances sont égales.

929. On peut appliquer à la surface latérale du bras le système décimal auprès de l'ancien système, pour en faciliter la correspondance et habituer à l'usage décimal, qui offre plus de facilité pour les calculs; et alors il faut construire la chape courante avec une large ouverture de chaque côté, comme celle des couteaux A ou C, par où l'on puisse voir distinctement l'angle du couteau curseur et les divisions au-dessous. La subdivision de la figure par 4 onces peut y être portée jusqu'à la demi-once (1).

930. Il a été dit, dans le premier article de Physique générale (213), que *peser, mesurer, comparer* sont des moyens indispensables pour étudier les effets de la nature; il y faut ajouter ici l'art d'*expérimenter* avec ordre et celui de tirer des inductions exactes, comme bases de la théorie mécanique, et par suite de l'Horlogerie, application la plus subtile et la plus délicate de la science du mouvement; le talent et l'habitude d'opérer suivant les bonnes méthodes de la main-d'œuvre n'y sont pas moins nécessaires.

931. Après avoir tiré les principes de la mécanique, *de l'équilibre dans la balance ordinaire*, il ne sera pas hors de propos de placer ici une remarque importante sur l'usage

(1) Il est indispensable de connaître l'emploi du levier, même dans les usages ordinaires, et de se familiariser avec les principes et les lois qui régissent cette matière, soit pour résoudre facilement les moindres questions d'Horlogerie de ce genre, soit pour en approfondir de plus difficiles. *Berthoud*, par exemple, donne la description d'un levier particulier pour connaître l'intensité première de la force motrice sur la fusée, à l'occasion du calcul du poids du balancier : or, ce levier particulier étant rarement entre les mains des artistes, on opérerait mal en croyant que le levier à égaliser la fusée au ressort, employé à l'ordinaire, pourrait remplacer celui de *Berthoud;* mais cela peut s'obtenir en effet, si l'on a la précaution de le disposer convenablement et avec la connaissance des effets du levier; car celui-ci doit être mis en équilibre sur sa mâchoire coulante, placée à son milieu, pour que les deux bras égaux se neutralisent, en l'absence du contre-poids coulant. Après cette disposition établie, on y placera ce contre-poids d'une pesanteur connue d'avance, et par sa distance sur l'un des bras d'avec le centre de la mâchoire et du carré de fusée, on pourra savoir combien de gros peut soutenir horizontalement la fusée tirée par le ressort et sa chaîne à une distance de quatre ou cinq pouces, plus ou moins, du centre de la fusée; mais si la connaissance des effets du levier ne déterminait pas à prendre ces précautions, si on laissait le levier attaché par une extrémité à la mâchoire, et le contre-poids coulant avec la verge toute d'un seul côté, on tomberait dans l'erreur en compliquant des effets étrangers à la question, et qui rendraient l'opération entièrement fausse. Or, ce n'est là encore qu'un des moindres inconvénients de l'ignorance des principes du levier, applicables à quantité d'autres questions encore plus importantes.

de cet instrument, avec lequel on peut obtenir une grande précision, même en y employant une balance fausse et inexacte, si toutefois elle oscille avec toute la liberté réquise. On place le corps à peser dans un des bassins, et on en établit l'équilibre exact en mettant dans l'autre bassin du sable ou des grains de plomb, et en définitive des objets très-menus. On remplace ensuite le corps pesé dans le premier bassin par des poids connus, jusqu'à produire le même équilibre avec le sable, plomb, etc., restés constamment dans leur bassin ; la somme de ces poids connus est toujours l'équivalent exact du corps pesé d'abord, pourvu que les points de contact des suspensions soient restés les mêmes. Cette méthode excellente, dite *double pesée*, est due au célèbre *de Borda;* c'est un moyen de faire d'une balance ordinaire et fausse une sorte de balance romaine très-exacte. Nous reviendrons sur cette matière, en traitant de l'exécution d'une balance d'*essai* à l'usage de l'Horlogerie.

932. En calculant précédemment les effets des leviers, nous avons négligé leur poids particulier, en promettant d'y revenir plus loin : on trouve celui de chaque bras en déterminant son centre propre de gravité, et en ajoutant à la puissance et à la résistance le poids du bras de chacune d'elles, d'après la distance du centre de gravité de ce bras au point d'appui ; cela importe souvent peu dans bien des cas ordinaires. Le centre de gravité peut être trouvé pratiquement, avec une pièce à part de même forme et matière que chaque bras, mise en équilibre par le procédé simple suivant, qui sert à trouver le centre de gravité, par exemple, d'un triangle matériel comme ACB, fig. 8, pl. XXIII. On place ce triangle, fût-il même d'inégale épaisseur, *en équilibre* sur un tranchant de couteau, ou sur un autre angle quelconque suffisamment en ligne droite, d'abord suivant la direction de l'angle A, jusque vers le milieu du côté BC, et ensuite de B vers le milieu de AC, et si l'on veut encore sur la troisième direction de C, vers le milieu de AB. L'intersection G, commune à ces directions, est le centre de gravité, conçu toutefois au milieu de l'épaisseur au centre du triangle (1).

Composition et résolution de la force dans les machines au moyen du PARALLÉLOGRAMME DES FORCES.

933. Lorsqu'un corps est mis en mouvement ou pressé par plusieurs forces agissant sur lui à la fois et suivant les directions différentes, leurs effets se convertissent en une

(1) Le centre de gravité d'un *pendule composé* (qui n'est pas le centre d'oscillation de sa longueur *virtuelle*) se trouve ainsi très-approximativement, en plaçant carrément une ligne transversale du pendule sur le tranchant d'une lame de couteau maintenue de champ. C'était l'usage de l'habile géomètre *de Prony*, quand il calculait les effets du *curseur* d'un pendule pour un artiste qui les ignorait, et que ce savant aidait fréquemment de ses connaissances, appliquées à divers cas analogues. Le *curseur*, inventé par *Huyghens*, a sa théorie expliquée dans son ouvrage *de Pendulo oscillatorio*, etc. *Berthoud*, qui l'a employé en gardant le secret, en dit à peine deux mots (*Hist. de la mes. du T.*) ; mais ceux qui ne connaissent pas ce moyen en trouveront la pratique utile et développée dans la suite de ce livre. On pourrait y procéder plus rigoureusement par la méthode de l'*analyse*, dont le calcul très-long en est d'autant plus sujet aux erreurs. Du reste, la méthode pratique est bien suffisante, puisque, même avec le calcul, il faut toujours en venir à tâtonner les justes longueurs par des moyens pratiques.

seule force, et suivant une direction moyenne ou intermédiaire, que l'on nomme la *résultante* des forces; on trouve celle-ci au moyen d'un parallélogramme construit sur le principe suivant : « Si les quantités et les directions de deux forces sont exprimées par les « longueurs et les directions des côtés adjacents ou contigus d'un parallélogramme, sa « diagonale intermédiaire exprime aussi la *résultante* des forces composantes. » C'est ce qu'on nomme, en mécanique, *composition de la force.*

934. Lorsque, au contraire, une force unique est divisée et répartie sur plusieurs autres directions, c'est encore au moyen du parallélogramme des forces que l'on connaît les forces particulières à *substituer*, pour remplacer et représenter l'effet de la force unique primitive, et cette opération est nommée *décomposition* ou *résolution* des forces.

935. On appelle *conspirantes* les forces dont la direction favorise les progrès du corps vers un même sens; si cette direction ou l'une des directions est en sens contraire, la force de celle-ci devient *opposante* et diminue d'autant l'intensité de la *résultante.*

936. En *dynamique*, relativement à la *composition* comme à la *résolution* des forces, les propositions suivantes sont tellement démontrées par l'analyse et confirmées par l'expérience, qu'elles peuvent être considérées ici commes des *axiomes.*

De la composition des forces.

937. Si un corps A, fig. 1, pl. XXIII, est frappé ou poussé à la fois par deux forces égales, l'une suivant la direction AB et l'autre suivant celle AC, qui sont entre elles à angle droit, le corps A, mis ainsi en mouvement, suivra une direction intermédiaire AD diagonale du parallélogramme carré ABDC, dont les côtés contigus, droits et égaux aussi, figurent la longueur et direction des forces primitives; cette diagonale sera parcourue par le corps A dans le même temps qu'il aurait employé à parcourir un des côtés contigus AB ou AC, par l'effet à part de l'une de ces deux forces égales. Alors la diagonale, toujours plus longue dans le carré que l'un de ses côtés, donnera la direction et la mesure de force ou vitesse *résultante* pour le corps A, d'après les directions et forces ou vitesses primitives AB, AC.

938. Les deux impulsions réunies sembleraient devoir produire une force presque double; mais il est loin d'en être ainsi, parce qu'elles ne conspirent qu'en partie vers le point D, par suite de leur divergence entre elles et à l'égard de ce point, divergence qui occasionne le parallélogramme, et aussi parce qu'elles se contrarient en partie mutuellement par la même cause : il en résulte que la force ou vitesse du corps A n'est augmentée que suivant le rapport de la diagonale avec ses côtés.

939. On sait déjà généralement que la diagonale d'un carré est par sa nature plus longue que ses côtés, et, de plus, qu'elle est *incommensurable* avec eux, *Eucl., prop.* 32 *et* 47, c'est-à-dire que son rapport avec les côtés ne peut être exprimé en nombres que par une approximation que l'on peut rendre néanmoins plus que suffisante dans l'application.

940. Si les directions des forces primitives égales forment un angle aigu quelconque, comme figure 2, ou si les forces sont inégales, comme figures 3 et 4, il en sera de même

pour l'expression de la *résultante*, au moyen de la diagonale; car les longueurs des côtés et leur inclinaison représentent les intensités comme les directions des forces, et leur sont proportionnelles : d'où il suit, comme il a été dit, que chaque côté contigu en A, quelle que soit sa longueur, sera parcouru par la force de sa direction, dans le même temps que l'autre côté contigu par la force de la sienne; or, la diagonale de chaque parallélogramme a aussi la propriété d'être parcourue dans le même temps; elle représentera donc toujours, par son rapport avec les deux côtés contigus, le rapport de la *résultante* avec les deux forces dont elle se compose.

941. Ces propositions sont susceptibles d'une complète démonstration géométrique; mais pour abréger, en renvoyant à cet égard aux auteurs du genre, nous passerons à l'application, et les articles non démontrés seront toujours donnés comme axiomes.

942. Ainsi donc les forces et directions primitives étant données dans les quatre premières figures, pl. XXIII, par la longueur et la direction des côtés contigus formant l'angle A de leurs parallélogrammes, on opérera ainsi qu'il suit :

943. On portera sur AB, à partir de A, autant de divisions égales, d'un pouce ou autre mesure, qu'il y a de livres ou d'onces supposées dans la force donnée de la distance AB, et l'on tirera sur la dernière division en B, et du côté D vers lequel conspirent les forces, une ligne BD parallèle à la direction AC : on portera de même sur AC, à partir de A, autant de pouces ou divisions semblables aux premières qu'il y a de livres ou d'onces dans la force de l'autre direction donnée AC, et l'on tirera sur sa dernière division en C la ligne CD parallèle à celle AB, ce qui formera le parallélogramme ABDC. Alors le point d'intersection ou sommet de l'angle en D, opposé à l'angle A, sera l'extrémité de la diagonale pointillée, à tirer de A en D. On divisera ensuite cette diagonale en *autant de* pouces ou autres divisions semblables aux précédentes *qu'elle en pourra contenir*, même avec fraction; et cette même diagonale donnera dans les quatre figures, par ses divisions et sa direction, la mesure en livres ou en onces, et la direction de la force ou vitesse AD, *résultante* des forces ou vitesses et directions primitives AB et AC.

944. Si l'on cherche la composition d'un plus grand nombre de forces primitives à réunir en une seule, après avoir opéré d'abord sur deux de ces forces comme ci-dessus, la résultante trouvée deviendra un des côtés contigus d'un nouveau parallélogramme à faire, dont l'autre côté contigu sera la troisième force donnée; leur résultante pourra être de même combinée avec une quatrième force, et ainsi de suite.

De la résolution de la force.

945. On emploie aussi le *parallélogramme des forces* pour résoudre, diviser ou transformer une force unique en plusieurs autres, et suivant des directions données, opération nommée *résolution de la force;* elle est en quelque sorte inverse de la précédente, et l'on procédera comme il suit :

946. Ayant la force unique donnée de quantité et direction, soit que cette force tire

par son poids, comme figure 15, pl. XXIII, soit qu'elle exerce une impulsion comme on l'a supposé dans les figures précédentes, au *point voulu* de sa direction, et sur son prolongement droit au delà de ce point, on marque autant de divisions d'un pouce, par exemple, que la force unique représente de livres ou d'onces; et les deux directions nouvelles étant déterminées et tracées à partir du même *point voulu*, on fait passer, par la division la plus éloignée du prolongement, deux lignes parallèles aux nouvelles directions, avec lesquelles ces parallèles forment un parallélogramme; puis, portant sur chaque côté contigu ou sur chaque parallèle correspondante les mêmes divisions en pouces qui ont mesuré le prolongement de la force primitive, et autant que chaque côté contigu en pourra contenir, même avec une fraction, la valeur en pouces et fraction de pouce de chaque côté contigu représentera la quantité de chaque force dans sa nouvelle direction, dont l'ensemble doit être substitué à la force unique primitive. L'on connaîtra ainsi à la fois les forces résultantes d'une impulsion primitive, si cette force pousse, ou celles qui lui feraient équilibre si cette force est en tirage. La somme totale des deux forces dépasse toujours celle de la force unique, à cause de la divergence, comme on a vu précédemment deux forces conspirantes perdre de la somme totale que produiraient leurs intensités particulières. Nous allons bientôt en donner plus loin un exemple d'application (art. 969).

947. Chacune des deux nouvelles directions ci-dessus peut aussi être résolue de la même manière en deux autres, et chacune de ces dernières en deux direction nouvelles, et ainsi de suite, parce que chaque direction obtenue pourra devenir un des côtés contigus d'un nouveau parallélogramme, dont une nouvelle direction formera l'autre côté contigu, etc.

948. Les démonstrations analytiques de ces simples propositions appartiennent à la dynamique, et dépasseraient trop les bornes de ces notions élémentaires, où nous avons essayé d'y suppléer par le raisonnement commun. On en trouvera les solutions mathématiques dans les ouvrages des *Bernouilli*, *Euler*, *Clairaut*, *Montigny*, *d'Alembert*, etc. On peut aussi, à défaut d'être en état de consulter ces auteurs ou de les avoir sous la main, employer la méthode pratique et approximative du tâtonnement graphique, d'après les directions et quantités des forces données, auxquelles pourrait satisfaire l'un de plusieurs parallélogrammes essayés.

949. Puisqu'on peut construire un parallélogramme ABDC autour de toute droite AD, en formant dans ce parallélogramme deux triangles égaux et opposés sur la droite AD, prise pour base commune, il s'ensuit que tout mouvement rectiligne peut toujours, s'il en est besoin, être considéré comme composé de deux autres.

950. Et, comme dans cette formation d'un parrallélogramme autour de la droite AD la proportion des côtés AC, AD peut varier et être prise à volonté, de même aussi le mouvement primitif simple AD peut être composé d'une infinité de manières différentes; ainsi, un même mouvement rectiligne peut être composé d'une infinité de mouvements simples, et par conséquent peut être décomposé, suivant le besoin, d'une infinité de manières.

951. On a déjà vu que, dans le mouvement composé uniforme, la vitesse produite par deux mouvements qui conspirent est à la vitesse de chacun d'eux pris séparément, comme la diagonale A D du parallélogramme, suivant les côtés duquel ils agissent, est à chacun de ses côtés A B ou A C.

952. Car, en même temps que l'une des deux puissances emporterait le mobile dans le côté A B du parallélogramme, et l'autre dans le côté A C, figure 1 à 4, elles l'emportent à elles deux lorsqu'elles se réunissent le long de la diagonale A D. La diagonale est donc l'espace décrit par les forces conspirantes dans le même temps. Or, dans le mouvement uniforme, les vitesses sont comme les espaces parcourus dans un temps donné ; donc la vitesse provenant des forces conspirantes est à la vitesse de chacune des forces en particulier comme A D est à A B ou à A C.

953. Ainsi, les forces conspirantes étant données, c'est-à-dire la *raison* des vitesses étant donnée par les droites A B, A C, données de grandeur, et la direction de ces forces étant donnée de position par ces lignes ou par l'angle qu'elles doivent faire, la vitesse et la direction du mouvement oblique intermédiaire sera aussi donnée, parce que la diagonale est alors donnée de grandeur et de position.

954. Dans les mouvements composés produits par les mêmes forces égales, la vitesse de la résultante est d'autant plus grande que l'angle formé par les directions est moindre ou plus fermé ; et cette vitesse est d'autant moindre que cet angle est plus grand ou plus ouvert.

955. Il s'ensuit que, la vitesse des forces conspirantes et l'angle de leur direction dans un cas particulier étant donnés, on peut dès lors *déterminer* la vitesse du mouvement composé, et par conséquent les rapports des vitesses produites par les mêmes forces sous différents angles de direction.

956. Si les forces *composantes* agissent presque dans la même direction, le mobile se meut d'autant plus vite. Si les forces sont égales et tout à fait *parallèles*, le mobile sera mû avec une vitesse ou une force double de l'une des deux forces primitives égales, ou bien avec une vitesse composée de deux forces inégales réunies; mais, la direction de son mouvement n'étant point changée, le corps se meut d'un mouvement simple et en ligne droite. Si les deux forces sont égales et opposées l'une à l'autre, elles se détruisent mutuellement. Alors le corps ne sort point de place, et il n'y a aucun mouvement de produit.

957. Si les forces opposées sont inégales, elles ne se détruisent qu'en partie ; le mouvement qui en résulte est l'effet de leur différence, c'est-à-dire de l'excès de la plus grande force sur la plus petite.

958. Si ces deux forces font angle l'une avec l'autre, elles retarderont ou accéléreront le mouvement l'une de l'autre, selon que l'obliquité des lignes qui les représentent sera dirigée.

959. On voit donc que l'on peut également considérer toutes les forces comme étant réunies dans une seule force qui les représente, comme aussi considérer cette force unique comme étant divisée en celles qui la composent. Cette méthode est d'un fréquent

usage et d'une grande utilité dans la mécanique, pour découvrir la quantité d'action des corps qui agissent obliquement les uns sur les autres.

960. Deux forces communiquées à un corps, soit instantanément, soit en continuant toutes deux leur même action, impriment à ce corps une direction moyenne, avec une force ou vitesse uniforme dans le premier cas ou accélérée dans le second, suivant la nature de la force, et toujours en ligne droite ; mais si l'une des forces continue seule d'agir sur le corps, ou si, toutes deux continuant d'agir, l'une reste uniforme tandis que l'autre produit de l'accélération ; ou enfin si, toutes deux produisant de l'accélération, l'une des deux a une progression différente de l'autre, alors le corps parcourra une courbe quelconque, toujours produite par un mouvement composé de forces de différente espèce ou intensité. Telle est la cause productrice de diverses courbes décrites par des corps. Mais avec deux forces communiquées, soit instantanément, soit avec continuité d'action, uniforme, ou accélérée ou retardée également dans les deux forces, la ligne parcourue par le corps est toujours droite ; et lors même que l'action instantanée des deux forces primitives, ou de l'une d'elles, aurait été produite par un mouvement circulaire, le corps abandonné subitement, ou conduit continuement, avec la même intensité et le même rapport entre les deux forces, ce corps suit la *tangente* de la courbe que nous supposons ici avoir produit le mouvement. Or, cette tangente est nécessairement perpendiculaire au rayon de son origine, c'est-à-dire au rayon du point de contact où la tangente commence, et l'on sait que la tangente est toujours une ligne droite perpendiculaire ou à angle droit sur l'extrémité de son rayon d'origine : donc le corps frappé ou poussé ainsi suivra une ligne droite. La *tangente*, le *rayon*, la *sécante*, etc., sont définis et expliqués plus loin dans une note, page 95.

961. La démonstration géométrique des questions précédentes sur le parallélogramme des forces peut être supplée par les applications suivantes très-faciles à comprendre :

962. Nous avons dit : Quand les côtés du parallélogramme ne sont pas égaux, c'est parce qu'ils représentent les forces ou vitesses inégales agissant sur le corps A, figures 2 et 4; mais ces côtés inégaux n'en sont pas moins parcourus en temps égaux, puisque leurs longueurs représentent la quantité de chaque force, et qu'une force double doit faire parcourir au corps A un espace double dans le même temps, comme une force moitié moindre lui ferait parcourir un espace moitié plus court dans ce même temps ; il en est ainsi de toutes autres quantités relatives, et l'on a vu que, par la même raison, les diagonales sont parcourues aussi dans le même temps.

963. Ainsi, dans la figure 1, les forces égales étant supposées chacune de cinq livres ou onces, et AB étant divisé en cinq parties, comme cinq pouces, ou lignes, ou centimètres, et AC contigu et de longueur pareille à AB, étant divisé en autant de parties semblables, puisqu'ici les forces sont égales, la diagonale AD, divisée en mêmes mesures, en contiendra très-près de 7, accusant près de 7 livres, ou onces, comme produit de la résultante des deux forces dont le total serait 10 livres, ou onces, si elles convergeaient *parallèlement* sur D ; mais alors le parallélogramme s'évanouirait, puisqu'il n'a lieu que

par la divergence actuelle des forces, qui en détruit une partie et en réduit l'effet de dix livres à sept.

964. Il en est de même pour la figure 2 à forces égales, mais inclinées l'une à l'autre en angle aigu, et formant un rhombe ou losange dont les côtés contigus en A sont égaux, mais plus approchant de converger vers D. Ces forces égales étant supposées chacune de six livres ou onces, et leurs côtés contigus étant par suite divisés en 6 parties, la diagonale résultant en AD contient 9 et environ 3/4 de ces mêmes divisions, ce qui établit que la force résultante dans ce parallélogramme obliquangle est plus grande que dans le carré figure 1, et que les forces primitives plus convergentes vers D, figure 2, se détruisent moins entre elles. Si les côtés contigus de la figure 2 avaient été divisés en 5, comme dans la figure 1, leur diagonale aurait contenu environ 8 divisions et de plus une fraction, au lieu de *près de* 7. Car une fraction doit toujours s'y rencontrer, puisque la diagonale, comme *incommensurable*, ne contient jamais une quantité juste de mesures quelconques de ses côtés. Le contraire peut paraître avoir lieu accidentellement avec le compas, moyen pratique insuffisant en géométrie, où l'on exige que le principe soit démontré, non par une mesure graphique et matérielle, dont rien ne prouve l'exactitude mathématique, mais par des raisons qui résultent de l'essence des éléments employés, et des qualités, propriétés ou dimensions qui leur ont été attribuées dans l'origine. Ces raisons alors ne peuvent être que certaines, puisqu'elles sont basées sur les qualités constituantes, convenues et accordées à chaque élément de la combinaison. Or, ce sont ces conditions des éléments employés, et non le compas, qui prouvent l'incommensurabilité de la diagonale (la plus longue dans le rhombe) avec ses côtés, mais la démonstration de cette proposition nous mènerait trop loin.

965. Dans la figure 3, les forces sont inégales, mais à angle droit, et la force 4 d'un côté contigu AB, n'est que la moitié de la force 8 de l'autre côté contigu AC; ici la résultante de la force par la diagonale n'atteint pas tout à fait 9.

966. Le parallélogramme obliquangle de la figure 4 est établi sur des forces primitives inégales, et au même degré que dans la figure 3, c'est-à-dire aussi entre elles comme 4 : 8; mais les forces, figure 4, sont obliques vers D, elles ne sont pas aussi divergentes et ne se détruisent pas autant que dans la figure 3; aussi, la résultante figure 4 arrive-t-elle à 10 et environ 1/3.

967. Nous avons préféré ici les lenteurs des formes géométriques pour expliquer un sujet qui aurait pu être succinctement renfermé dans une demi-page, à la manière de quelques modernes; tout y aurait été dit ou au moins sous-entendu, mais ceux qui ne sont pas exercés ne l'auraient pas aperçu en entier, à moins d'y avoir réfléchi longtemps, ce qui est assez rare. Or cette méthode développée, que nous emploierons encore pour le *plan incliné*, est infiniment plus propre à faire tout apercevoir sans trop de contention d'esprit, en présentant ainsi les conséquences et leurs rapports sous divers points de vue, lesquels se fortifient mutuellement et éclairent beaucoup mieux le principe général.

968. La même règle est encore confirmée par l'autre application que nous en

avons annoncée (946) et que nous reprenons dans les deux articles suivants :

969. Soit WB, figure 15, la direction verticale d'une force unique W que l'on veut résoudre entre deux forces BC et BD ; on prolongera, à partir du point B, la direction de WB jusqu'en A et d'autant de pouces que W représente de livres ou d'onces de forces. De la dernière division A, on tirera AE parallèle à BC, et AF parallèle à BD ; BC et BD étant les deux directions que l'on suppose données, on aura ainsi leur parallélogramme. Puis, divisant la ligne BF ou celle AE en autant de pouces qu'elles se trouveront pouvoir en contenir, même avec fraction, on comptera pour cette direction autant de livres ou d'onces avec leur fraction, que chaque ligne contiendra de divisions, et l'on aura une des forces BC. En divisant aussi BE ou FA de la même manière, on aura la force de BD, et l'on aura ainsi les deux forces obliques à BW résultantes ou équilibrantes de celle WB perpendiculaire. Ici les obliquités sont égales et leurs quantités aussi, parce que les deux lignes de direction sont entre elles à angle droit, et que le parallélogramme devient un carré parfait. Les points d'attache C et D des cordes que représentent les lignes BC et BD étant aussi à même hauteur, il en résulte que la tendance à l'équilibre de B réprésentant une poulie, la détermine à se placer au milieu des deux attaches. Mais si la poulie B était retenue hors du milieu par quelque obstacle qui n'empêchât point l'action verticale de W, il en résulterait un parallélogramme obliquangle avec côtés contigus et inégaux, obliques aussi entre eux. On voit néanmoins, par les divisions supposées toutes bien égales entre elles des lignes de cette figure, que la somme totale 8 1/2 des deux côtés contigus, chacun de 4 et 1/4, surpasse celle de la diagonale BA qui n'est que de 6, propre force de W, et que chaque côté emploie plus de 3, moitié juste de la force de W, pour lui faire équilibre ; et qu'enfin, par la seule obliquité des directions sur BA, W tient en équilibre deux forces dont le total est supérieur à la sienne.

970. Si le diamètre de la poulie au fond de sa gorge, joint à celui de deux cordes, égalait la distance entre les deux points d'attache CD, en sorte que les deux cordons, alors verticaux, descendissent parallèlement, il n'y aurait plus de parallélogramme, et chaque cordon vertical ne supportant alors que juste la moitié de W, le tirage de chacun serait égal à 3, moitié de W, et leur somme 6, égale à celle totale de W, suffirait seule pour lui faire équilibre.

971. Les deux points d'attache C et D supportent la même quantité de tirage ; mais la poulie C suppose que ce côté puisse être garni d'un contre-poids, et dans l'état actuel de la figure ce contre-poids, pour faire équilibre à la moitié de 6 livres qui est 3, doit être de 4 livres 1/4 en raison de l'obliquité de son tirage sur la poulie actuelle B. L'obliquité et le tirage de DB sont semblables ; mais, le cordon DEB étant attaché à un point fixe D, il n'y a pas lieu ici d'y appliquer la même remarque, quoique, en principe, le tirage en excès y soit le même.

972. Si, en élevant W et B, l'angle CBD devenait obtus, la différence des forces équilibrantes serait encore plus marquée, car elle augmente avec une progression croissante très-rapide, à mesure que l'angle devient plus obtus, et surtout lorsque

les deux rayons qui le forment approchent de se confondre avec le diamètre. Cet effet est tel, qu'aucune puissance ne pourrait tendre une corde horizontale sans la rompre bien avant qu'elle approchât de paraître droite. Si un fil de fer que l'on sait capable de supporter un bien plus grand poids qu'une corde d'un diamètre décuple est tendu horizontalement par une force très-près de le rompre, il sera encore loin de décrire une ligne droite; elle sera sensiblement courbe dans le sens de la gravité, tant est grand dans cette situation l'avantage du poids de ce fil, bien qu'extrêmement faible en comparaison du poids tendant (1).

(1) On démontre, en géométrie, que : « dans tout *rhombe* ou losange, connaissant un côté et une diagonale, on connaîtra pareillement l'autre diagonale. » En effet, les quatre côtés étant égaux, en ôtant le carré d'une diagonale donnée, du quadruple du carré du côté donné, le reste est le carré de la diagonale cherchée. Cette proportion géométrique est d'un grand usage dans la théorie des mouvements composés : car, dans un parallélogramme obliquangle, la plus grande diagonale est la sous-tendante d'un angle obtus, et la plus petite d'un angle aigu, qui est le complément du premier angle. La plus grande diagonale sera d'autant plus grande, et l'autre d'autant plus petite, que l'angle obtus sera plus grand (plus ouvert) : de sorte que si l'on conçoit que l'angle obtus croisse jusqu'à devenir infiniment grand par rapport à l'angle aigu, ou, ce qui revient au même, si les deux côtés contigus du parallélogramme sont étendus directement bout à bout en ligne droite, la grande diagonale devient la somme des deux côtés, et la plus petite s'anéantit. Maintenant, deux côtés contigus du parallélogramme étant connus avec l'angle qu'ils renferment, les géomètres savent qu'il est aisé de trouver en nombre la sous-tendante de cet angle, c'est-à-dire une des diagonales du parallélogramme; quand elle est trouvée, la proposition donne l'autre diagonale. La seconde diagonale ainsi trouvée est la ligne que décrirait un corps poussé ou tiré en même temps par deux forces qui auraient entre elles le même rapport que les côtés contigus qui désignent les directions suivant lesquelles ces forces agissent. Or, le corps décrirait cette diagonale en même temps qu'il parcourrait l'un ou l'autre des côtés contigus, s'il n'était poussé ou tiré que par la seule force qui correspond à chaque côté. C'est là un des grands usages de la proposition qui est en tête de cette note, entre deux *guillemets;* car, le rapport de deux forces et l'angle qu'elles font étant donnés, on a besoin quelquefois de déterminer en nombres la ligne qu'un corps, poussé par ces deux forces, décrirait dans un certain temps.

C'est ce qui explique comment un pont suspendu par des chaines d'une trop grande portée parvient aisément à arracher ses attaches d'avec les *culées*, ou à soulever ces culées elles-mêmes, à moins qu'elles ne soient formées d'une roche de très-grande dimension et dureté, ou qu'on n'y ait pourvu par d'autres moyens analogues et assez puissants, et que les attaches et les parties extrêmes des chaînes ne soient fortifiées graduellement et en proportion. C'est aussi ce qui faisait dire à un *observateur*, examinant les dispositions préalables d'un certain pont de ce genre, « qu'il se garderait bien de rester auprès des colonnes de la rive, lors de son décintrement, » et l'effet a justifié la prévision. Dans d'autres constructions plus réfléchies, une ou plusieurs piles intermédiaires permettent aux chaînes d'arriver sur les culées en traînant et en tirant sur la culée suivant une ligne presque horizontale. Alors la culée, contre-buttée directement par le pont même, ne peut faire aucun mouvement. C'est un exemple de l'importance en *dynamique* d'apprécier la direction et l'intensité des forces, comme il faut prévoir aussi en *mécanique* les pressions, les flexions, les frottements ou résistances accessoires et autres effets divers, que les forces doivent produire suivant les cas.

Ce que nous venons d'exposer en note, sur la manière de trouver la diagonale d'un rhombe par l'autre diagonale donnée avec un côté, est déjà trop abstrait pour des premiers éléments, et ce n'est pas ici le lieu de l'expliquer davantage; nous n'avons empiété sur ce sujet que pour ceux qui sont, en partie du moins, au courant de la matière, comme il s'en trouve en effet parmi nos lecteurs.

Les autres développements du texte, dans lesquels nous sommes amplement entrés, sont beaucoup plus simples et faciles à saisir pour toute intelligence ordinaire, que nos raisonnements peuvent mettre sur la voie; car, soit pour le parallélogramme des forces, soit même pour les plans inclinés, sujet un

973. Les articles ci-dessus sont propres à faire concevoir la convenance souvent peu observée du parallélisme parfait des deux parties de la corde qui soutient la poulie fixée au poids d'un *régulateur astronomique*, quand le peu d'espace pour la descente oblige de moufler ce poids, car on éviterait cette difficulté assez forte, avec une corde simple et non mouflée qui vaut toujours mieux. Mais, obligé d'employer le renvoi d'une poulie, on conçoit assez, par ce qui vient d'être dit plus haut, combien il importe que la puissance motrice conserve du haut jusqu'en bas la plus constante égalité. Si les deux cordons diffèrent peu de la verticale, ils ne paraîtront souvent pas sensiblement divergents quand le poids sera tout au bas, et chaque cordon ne paraîtra pas soutenir plus que la moitié du poids; mais dans le haut, à la fin du remontage, la divergence sera plus marquée et le tirage sera sensiblement augmenté, quoique les arcs paraissent exactement les mêmes; la différence peut être insensible à la vue sur le limbe, mais la pression sur les repos n'est plus la même. Il n'est pas facile en effet d'obtenir par les moyens usités ce parallélisme si nécessaire, parce que l'un des cordons change continuellement son point de tirage sur la longueur du cylindre ou tambour, à mesure qu'il se vide, tandis que l'autre cordon a son point d'attache fixe. Si le cordon fixe est attaché vis à vis le bout du cylindre où arrive la corde par le remontage, ce qui est le moins mal, et si les cordons sont parallèles en ce moment, ils ne peuvent plus l'être quand la corde est presque tout au bas, et tire en un point du cylindre plus éloigné du bout fixe. C'est toujours le cas le moins défavorable. Cependant on peut parvenir à éluder une grande partie de l'inconvénient, sinon la totalité, par un artifice assez simple qui n'entraîne par lui-même aucune influence sur la quantité de force motrice ni sur le rouage, et que nous indiquerons quand nous traiterons des soins à porter à un régulateur de précision.

DU PLAN INCLINÉ.

De la puissance des corps sur ce plan, et de celle du plan incliné soulevant ou pressant un corps (1).

974. L'étude des effets qui se rapportent au plan incliné embrasse diverses applications, telles que 1° la descente ou chute des corps sur ce plan, comme question physico-

peu plus avancé, ce n'est encore que de la pratique raisonnée, qui n'exige la connaissance préalable que d'une partie de nos premières notions de géométrie pratique très-abrégées, et quelques explications en note sur le *sinus* que nous n'avions pas données. Ceux qui auront le courage de persévérer dans la première lecture de ces articles, lors même qu'ils n'en comprendraient d'abord qu'une très-petite partie, n'ont qu'à recommencer, toujours avec réflexion. Le peu qu'ils auront compris d'abord, à une première lecture, leur en fera comprendre davantage à la seconde, et ainsi de suite; ils finiront par être tout étonnés d'avoir saisi l'esprit de cette théorie de première nécessité dans l'étude de la mécanique.

Généralement on lit trop vite, et « un grand moyen de forcer l'esprit de s'appliquer en détail et « d'apprécier la valeur des expressions est de copier lentement les articles difficiles, en y réfléchissant « à mesure. » Cette méthode facilite beaucoup les points qui embarrassent.

(1) Nous avons déjà manifesté assez l'intention de traiter nos articles suivant des méthodes pratiques, et nous continuerons toujours à le faire autant que possible; mais plusieurs artistes instruits et cultivant la haute Horlogerie, dont nous devons ambitionner le suffrage, nous ont engagé à ne pas les

mathématique, laquelle détermine aussi les lois de la descente du *pendule* dans le cercle et, considérée théoriquement, dans la courbe appelée *cycloïde* ; 2° la seule pression des corps sur des plans inclinés qui se rattache à la *mécanique statique* ; 3° l'action des corps en mouvement à l'égard des plans obliques qu'ils tendent à déplacer, et ce cas se rencontre fréquemment en Horlogerie, dans la levée des échappements, dans la menée des engrenages, dans le mécanisme de la répétition que l'on nomme *cadrature*, etc. 4° Un autre emploi du plan incliné est de fonctionner comme *coin* à l'aide de la percussion pour les fortes pressions opérées par diverses machines. 5° Enfin, le plan incliné sert de base et de mesure par la puissance de la *vis*, dont le filet oblique à la résistance est circulaire au lieu de se prolonger en ligne droite. Comme ces divers points de vue établis sur un même principe intéressent généralement le *mécanicien* proprement dit, et que l'Horloger-artiste ne peut se dispenser d'être mécanicien (1), nous passerons en revue

priver en entier de développements géométriques. Ceux qui suivent seront néanmoins très-accessibles aux lecteurs qui ont le goût de l'étude. Tels d'entre eux que ces questions n'intéressent pas, à raison de leurs travaux habituels, pourront sans inconvénient passer outre : ils trouveront plus loin assez d'autres sujets à leur goût ; peut-être même l'expérience les ramènera-t-elle plus tard à ces questions, qu'ils seront alors bien satisfaits de trouver éclaircies.

(1) Nous avons déjà rappelé très-succinctement au début de cet ouvrage, et plusieurs savent que *Graham*, l'un des premiers Horlogers anglais qui eurent une réputation vraiment méritée, était bon *mécanicien* et constructeur excellent. On n'exécutait point en Angleterre d'instrument important, même pour l'astronomie, sans consulter *Graham*. Il a construit lui-même plusieurs *secteurs* de douze à quinze pieds de rayon, qui donnaient la seconde de degré. Le dernier instrument de ce genre était dans l'observatoire de *Lemonnier*, traducteur des *Institutions astron.* de Keill. *Graham* créa la compensation du *pendule* par le mercure, qui se pratique encore avec avantage ; il appela le premier, dans un mémoire adressé, en 1726, à la Société royale de Londres, l'attention des savants et des artistes sur la dilatation des métaux, à peine soupçonnée alors, et ce fut d'après cet écrit que *Harisson* composa son gril métallique, d'une exécution plus facile, sans être d'un effet supérieur à l'emploi du mercure. On sait assez que *Graham* inventa deux excellents échappements, l'*ancre* et le *cylindre* ; celui-ci pour les Montres à l'usage civil, et l'autre pour le *régulateur* à secondes ; ils sont encore au rang des meilleurs. *Sully*, Horloger anglais de talent, accueilli en France, y obtint plus facilement qu'un Français, suivant l'usage, la direction des manufactures d'Horlogerie de Versailles et de Saint-Germain, qui ne se soutinrent pas. Cet artiste s'occupait déjà du problème des *longitudes* par l'Horlogerie, il communiqua ses projets à *Graham*, qui les critiqua judicieusement et avec modération, et prédit exactement les causes qui nuisirent à leur succès. *Graham* n'avait point cette jalousie qui déshonore le mérite. On lui fit voir une répétition de notre célèbre JULIEN ; le patriarche de l'Horlogerie anglaise l'examina avec attention, la trouva parfaitement faite, et dit : « Je voudrais être moins âgé pour pouvoir en exécuter une sur le même calibre. » Cette réponse était modeste, car JULIEN, bon *mécanicien* aussi, mais plus jeune, n'avait pas encore atteint alors l'expérience et la science de l'artiste anglais.

Et cependant nous avons vu des Horlogers en réputation, en vogue pour certaines parties de leur art, ne pas connaître même les éléments de la mécanique ! ! ! Il réussissaient par l'habitude de bien imiter de bonnes constructions qu'ils n'avaient pas imaginées, par l'art d'employer les mains les plus habiles pour donner de grands soins à des compositions connues, et qui recevaient parfois quelques améliorations ; mais aussi, quand ils ont voulu composer des échappements et autres parties neuves, ces inventions, après avoir fonctionné un certain temps, finissaient par développer bientôt des défauts majeurs qui obligeaient leurs auteurs mêmes à y renoncer sans le dire. D'où il est résulté souvent que ces compositions ont été copiées par des Horlogers qui en ignoraient les défauts, tandis que l'auteur les avait depuis longtemps condamnées en secret. On peut aisément réussir dans quelques détails

ces diverses applications, en n'exposant ici que des principes élémentaires, et non un traité complet de mécanique; et l'on conçoit assez que la nature de cet ouvrage ne le comporterait pas. L'article sera un peu long en raison des nombreuses et délicates conséquences qu'il entraîne, mais aussi il importe trop à toutes les questions de ce genre pour le négliger, et l'artiste doit nécessairement le connaître, quelque abstrait qu'il paraisse; on n'apprend rien sans effort et persévérance. Du reste, ces premières notions suffiront à presque tous les cas ordinaires, et pourront même mener plus loin, et paraître beaucoup plus abordables, à mesure que l'on s'en pénétrera davantage.

Lois générales de la descente des corps sur des plans inclinés.

NOTA. Malgré l'apparence abstraite de la matière que nous traitons, on verra, en l'examinant, que nous ne tombons pas ici dans le défaut reproché à plusieurs auteurs, d'étaler un appareil scientifique que trop de lecteurs ne peuvent pas suivre. Nous pouvons assurer que, quelque peu versé que l'on soit dans ces études, on n'aura qu'à y porter une attention soutenue, lente et persévérante, pour saisir des questions qui n'offrent rien de trop mathématique, ni qui soit hors de la portée ordinaire. Ce ne sont au fond que de simples raisonnements de géométrie pratique, avec les renvois usités à des figures peu compliquées, où l'on n'emploie que des rapports arithmétiques d'un degré peu avancé. L'article précédent du *parallélogramme des forces* n'est qu'une méthode pratique et graphique aussi facile qu'elle est utile et commode. Celui du *plan incliné* est au fond aussi simple, puisqu'il donne la puissance des corps d'après les *sinus* de l'inclinaison du plan. A l'égard des *sinus*, la note au bas de la première page où il en sera question expliquera suffisamment cette mesure. Ce ne sont donc encore que des mesures pratiques à observer. Il y a loin de là aux questions de géométrie *transcendante*, qui exigeraient une tout autre étude, et dont nous n'abordons pas même ici les premières difficultés. La persévérance dans la lecture réfléchie et répétée de ces articles très-simples préparera d'ailleurs l'esprit aux raisonnements géo-

d'amélioration, ajouter quelques accessoires heureux, ou au moins agréables; mais, pour hasarder des compositions importantes, des échappements tout à fait nouveaux, etc., il faut être instruit à fond des principes qui régissent le sujet, et analyser assez exactement ses conceptions et les moyens d'application, pour être presque sûr du succès, même avant l'exécution. C'est ce qui a eu lieu pour les deux échappements de *Graham*. On y a bien apporté depuis quelques améliorations de détail, mais leur principe était excellent, et leurs principaux effets étaient assurés dès l'origine.

L'ambition, la vanité d'être distingué comme inventeur, et la spéculation avide qui se sert de ce prétexte, ne comportent pas cet examen sévère des productions avant de les publier, ni les études et la maturité que leur examen exige. C'est cette manière ambitieuse ou avide de procéder qui entraîne à des entreprises irréfléchies, séduisantes d'abord, et finissant par échouer contre l'expérience. Il y a souvent un mérite plus solide et plus vrai dans l'amélioration méditée et savamment raisonnée d'inventions déjà éprouvées comme bonnes en principe, mais susceptibles encore de quelque perfection, que dans des idées nouvelles que l'on n'a pas eu le temps ou le talent de mûrir assez, qui ne peuvent souvent atteindre le degré d'exactitude et la constance exigés qu'après une longue expérience et avec le secours d'une critique éclairée, ou qui ne peuvent même jamais y parvenir, si elles sont établies sur des bases erronées. L'instruction et la méditation garantissent de ces écueils ceux qui ont la patience et la persévérance d'étudier, et d'éprouver suffisamment leurs inventions avant de les produire

métriques, et l'on sera peut-être étonné de trouver ici moins de difficulté que l'on n'en aurait supposé.

975. On nomme généralement *plan incliné* celui qui est oblique relativement à l'horizon ; mais, en mécanique, on nomme ainsi tout plan dont l'obliquité s'oppose au mouvement primitif et naturel d'un corps, comme aussi tout plan dont la ligne est oblique à celle de la direction suivant laquelle ce plan lui-même est transporté tout entier, et sans changer la situation relative de sa figure.

976. Si un corps D est placé sur un plan incliné A C, figure 5, pl. XXIII, la pesanteur *absolue* de ce corps (sa pesanteur propre verticale) sera à sa pesanteur *relative* sur le plan A C, comme la longueur du plan A C est à sa hauteur A B.

977. Il est démontré qu'un corps tel que D qui est appuyé sur un plan incliné, perd toujours une partie de sa pesanteur absolue, et que la puissance ou force L agissant en L A D, par la poulie de déviation A nécessaire pour le soutenir dans une direction A C parallèle au plan, que cette force L, disons-nous, est à la pesanteur de D comme la hauteur B A du plan est à sa longueur A C. Cette proposition se démontre aisément en décomposant l'effort absolu de la pesanteur du corps D suivant Q F, en deux efforts Q G et Q E, dont l'un Q G est détruit par la résistance du plan auquel il est perpendiculaire ; l'autre effort Q E parallèle au plan est alors à l'effort total comme Q E est à Q F, c'est-à-dire comme A B est à A C, à cause de la similitude du triangle Q E F du parallélogramme E Q G F, avec le triangle A B C du plan incliné. D'où il suit que l'inclinaison du plan peut être si petite, c'est-à-dire si peu différente de l'horizontale C B, qu'une force très-petite suffise pour retenir dessus un poids considérable.

978. La force avec laquelle un corps pesant descend le long d'un plan incliné est à la force avec laquelle il descendrait perpendiculairement, comme le *sinus* de l'angle d'inclinaison du plan est au rayon, et par conséquent comme A B (sinus) est à A C (rayon), même figure 5 (1).

979. Supposons que l'on connaisse la pesanteur d'un corps, et qu'il soit question de

(1) Nous avons averti déjà que les notions élémentaires de géométrie pratique, chap. VI de notre première partie, étaient loin d'être complètes ; pour tout dire, il aurait fallu un traité entier, et ce n'était pas là sa place. Les articles actuels sont une occasion d'y ajouter, pour leur explication, ce qui suit :

Le *sinus* d'un arc de cercle quelconque, comme C*c*, par exemple, fig. 6, ou de son angle, *c*G C, moindre que 90°, ce *sinus* est une verticale *cp*, abaissée de l'extrémité *c* du même arc, en *p* sur son rayon G C.

Un *sinus* comme *cp* (ou tout autre) est toujours la moitié de sa corde qui soutend un arc *e*C E double, par exemple, de celui *c*C dont on vient d'indiquer le *sinus* simple, nommé souvent *sinus droit*, pour le distinguer de son *sinus verse*.

Le *sinus verse* est la partie restante du rayon G C comprise entre l'origine C d'un arc C*c* et le point d'arrivée de son *sinus* ou *sinus droit* en *p*, comme le sinus droit *cp ;* ainsi *p*C est *sinus verse* de C*c*.

Le *sinus total* est celui d'un arc *c*C A, quart du cercle, ou autrement de l'angle droit C G A de 90°, ce sinus total est égal en longueur au rayon A G, avec lequel il se confond, ou égal au rayon semblable G C, lequel rayon sert de mesure à la longueur des sinus, à partir du centre G jusqu'au point *p*, par exemple, ou autre suivant l'arc ; le reste du rayon mesure le sinus-verse C*p*.

Le rayon G C, considéré d'abord comme unité, peut être divisé en 60 ou plus de parties fraction-

trouver la puissance *p* nécessaire pour le soutenir sur un plan incliné *d;* appelant le poids *v* et la puissance *p*, on a par la règle précédente : « le *sinus total* est au *sinus* d'inclinaison, comme *v* est à *p*. » C'est-à-dire que : comme le rayon est au *sinus* d'inclinaison, ainsi le poids est à la puissance que l'on cherche, et alors, les trois premiers termes de la proposition étant donnés, le quatrième l'est aussi.

980. Les lois du mouvement des corps qui descendent sur des plans inclinés sont absolument les mêmes que celles du mouvement des corps libres qui descendent perpendiculairement, avec cette seule différence que la pesanteur et la vitesse doivent être diminuées dans la raison de la hauteur du plan à sa longueur. Nous indiquerons un peu plus loin la loi de descente des corps libres.

981. Nous venons de voir qu'un corps D placé comme dans la figure 5 tend évidemment à tomber suivant la verticale QH, en vertu de la gravitation, mais qu'il ne peut le faire dans cette direction à cause du plan incliné AC qui s'y oppose, et que l'action de la gravitation ou de la pesanteur suivant QH produit ici deux actions : l'une suivant QG perpendiculaire à AC, l'autre suivant QE dans la direction même de AC; nous avons vu que la pression suivant QG est détruite comme étant soutenue par le plan incliné, et qu'il ne reste plus que la force suivant QE avec laquelle le corps tend à tomber en glissant suivant le plan, ce qui aurait lieu effectivement si quelque puissance ne le retenait pas.

982. Mais la force QE, avec laquelle le corps tend à glisser, est moindre que la force absolue de la gravité du corps D suivant QF, et à proportion de QF, parce que l'hypothénuse ou sous-tendante QF du triangle rectangle QEF est plus grande que le côté QE :

983. L'on voit donc que le corps D tend à glisser sur le plan incliné, avec une force moindre que celle de sa pesanteur, et que le plan en soutient une partie.

naires; mais aujourd'hui on s'accorde à le diviser en 100,000 parties égales, pour servir de mesure aux diverses longueurs ou hauteurs, des *sinus droit* et *verse*, *cosinus* et *cosinus verse*, etc.

L'arc *d*C ou l'angle de 30° *d*GC ont leur sinus *dg* égal en longueur à la moitié C*h* du rayon GC, ce qui indique que le sinus de l'angle de 45° CG*c*, quoique moitié de l'angle droit, a la hauteur de son sinus plus grande que la moitié du rayon, vu que les degrés du cercle sont une mesure d'une tout autre espèce que les divisions du rayon. Il y a des tables qui donnent les sinus, tangentes, etc., en parties du rayon, pour chaque degré et minute de degré des angles. L'angle de 45° a seul son sinus *cp* égal à son cosinus *cl*.

La *tangente* de l'arc C*c* est la ligne C*i*, toujours perpendiculaire, comme en C, à son rayon d'origine GC, ou à tout autre rayon d'origine, également perpendiculaire à sa tangente.

La *sécante* G*ci* de l'arc C*c* est le rayon G*c*, prolongé jusqu'à la rencontre *i* de la tangente C*i*, dont la sécante détermine la longueur.

L'arc complémentaire *c*A, ou le complément d'un arc C*c*, par exemple, pour arriver à 90°, a aussi son sinus droit *cl* et son sinus verse *l*A, nommés pour les distinguer *cosinus* et *cosinus verse*. L'arc A*d* de 60°, complément de l'arc C*d* de 30°, pour arriver à 90°, cet arc complémentaire A*d* a son cosinus droit *dm* et son cosinus verse *m*A, ainsi que tout autre arc complémentaire quelconque.

On trouve dans les auteurs, par abréviation, sin. pour *sinus*, cos. pour *cosinus*, tang. ou T pour *tangente*, cot. pour *cotangente*, sec. pour *sécante*, cosec. pour *cosécante*, r. pour *rayon*. Ces explications, un peu plus développées ici, se trouvent en tête de plusieurs traités de trigonométrie. *V*. Éléments de géométrie et de trigonométrie, par *Clairaut* et autres auteurs.

De plus, on a vu que les triangles QFE et ACA sont semblables; car les angles en B et en E sont droits, et l'angle Q est égal à l'angle A.

985. D'où il suit que QE est à QF, comme AB est à AC, et que la force du poids pour glisser est à son poids absolu comme la hauteur AB du plan est à sa longueur AC.

986. Il suit encore : 1° que le corps D ne pressant plus sur le plan incliné que par sa pesanteur respective ou relative, le poids L, dont la force verticale est appliquée ici au moyen de la poulie A de déviation (que nous supposons sans frottement, comme aussi le glissement de D sur AC), retiendra ou soutiendra le corps D, pourvu que la pesanteur de L soit à celle propre de D comme la hauteur BA du plan incliné est à sa longueur AC, ou comme EQ est à QF.

2° Si l'on prend pour *sinus total* (ou rayon) la longueur du plan CA, AB sera le *sinus* de l'angle d'inclinaison ACB. C'est pourquoi la pesanteur absolue du corps est à sa pesanteur respective, suivant le plan incliné, et aussi le poids D est au poids L suivant la direction LA (ou AD qui soutient D), comme le *sinus total* est au *sinus* de l'angle d'inclinaison.

3° Les pesanteurs respectives du même corps, sur différents plans inclinés, sont donc l'une à l'autre comme les *sinus* de leurs angles d'inclinaison.

4° Plus l'angle d'inclinaison est grand (ouvert relativement à sa base CB), plus aussi est grande la pesanteur respective ou relative.

5° Ainsi, avec un plan vertical où l'angle d'inclinaison est le plus grand possible (90°), puisqu'il est formé par une perpendiculaire à la base, la pesanteur respective est égale à la pesanteur absolue; et avec un plan tout à fait horizontal, où il n'y a aucune inclinaison, la pesanteur respective s'anéantit totalement.

Nota. On doit supposer que le cylindre L, malgré sa proportion un peu longue dans la figure 5, peut au besoin n'être pas plein, et être par suite d'un poids voulu inférieur à celui du corps D, qui peut représenter une sphère plus ou moins pleine.

987. Le parallélogramme EQFC de cette figure 5 est un carré parfait, parce que le plan d'inclinaison AC est de 45°, moitié de l'angle droit, et qu'il y a en D autant de tendance à glisser que d'appui perpendiculaire sur AC, égalité exprimée par celle des côtés contigus égaux du parallélogramme. Avec un plan d'une inclinaison environ moitié moindre, comme celle de la ligne pointillée de C en L, la perpendiculaire de pression sur ce plan CL, correspondante à celle QG du premier parallélogramme carré, deviendrait d'autant plus longue, et celle qui correspond à QE serait d'autant plus courte, puisque la tendance à glisser vers C serait d'autant moindre. Si le plan était, au contraire, plus incliné que AC d'environ une moitié en sus, et suivant à peu près une ligne pointillée de C vers D, ce serait QE du premier parallélogramme carré qui s'allongerait d'autant que la tendance de D à glisser vers C serait augmentée, et QG du carré serait raccourci à proportion, comme dans le parallélogramme pointillé sur la ligne de C vers D, où sa longueur est portée vers le sens de DC; quant aux longueurs exactes des côtés contigus des deux parallélogrammes pointillés, elles seraient

données par les règles ci-dessus des *sinus*, réduites définitivement et pour le fond à ce qui suit :

988. Pour trouver le sinus de l'angle d'inclinaison que doit avoir un plan, afin qu'une puissance donnée L puisse y soutenir un poids donné D, fig. 5, dites : « Le « poids donné est à la puissance donnée comme le *sinus total* est au sinus de l'angle « d'inclinaison du plan. » Ainsi, en supposant qu'un poids de 1,000 livres doive être soutenu par une puissance de 50 livres, on trouvera que l'angle d'inclinaison doit être de 1° 52′.

989. « Au reste, nous supposons dans toute cette théorie que la puissance tire parallèlement à AC, c'est-à-dire à la longueur du plan ; et c'est la manière la plus avantageuse dont elle puisse être appliquée. Mais, si elle tire suivant toute autre direction, il ne sera pas difficile de déterminer le rapport de la puissance opposée à la force du poids. Pour cela, on mènera par le point de concours de la direction verticale du poids et de la direction de la puissance opposée une perpendiculaire au plan AC ; or, pour qu'il y ait équilibre, il faut, 1° que cette perpendiculaire tombe sur la base du corps (le point en contact avec le plan, si le corps est sphérique), et non au delà ni en deçà, car autrement le corps glisserait ; 2° qu'elle soit la direction de la force résultante de l'action du poids et de celle de la puissance ; car il faut que la force résultante de ces deux actions soit détruite par la résistance du plan, et elle ne peut être détruite, à moins qu'elle ne soit perpendiculaire au plan. On fera donc un autre parallélogramme dont la diagonale sera cette perpendiculaire, et dont les côtés contigus seront pris sur les directions de la puissance et du poids, et le rapport des côtés de ce parallélogramme sera celui de la puissance et du poids. Voyez, pour la figure et le texte, la *Mécanique de Bossut*. » (D'Alemb.)

Lorsqu'un contre-poids L (fig. 5) descend selon la direction perpendiculaire AB, en élevant le poids D suivant une direction parallèle au plan incliné, la quantité de l'élévation du poids D est à celle de la descente du contre-poids L, comme le *sinus* de l'angle d'inclinaison C est au sinus total.

990. D'où il suit : 1° que la quantité de descente du contre-poids L est à la quantité de l'élévation du poids D, réciproquement, comme le poids D est au contre-poids équilibrant L ; 2° que des puissances sont égales lorsqu'elles élèvent des poids à des hauteurs proportionnelles à ces poids ; et c'est ce que d'habiles géomètres ont pris pour principe par lequel ils démontrent les forces des machines.

991. On voit aussi la raison pourquoi il est beaucoup plus difficile de tirer un chariot chargé et montant un plan incliné, que de le tirer sur un plan horizontal, puisqu'il faut vaincre une partie du poids qui est à la pesanteur totale dans le rapport de la hauteur verticale du sommet du plan à sa longueur.

992. Nous avons été forcés, par la nature de cet ouvrage, d'abréger ces éléments et d'en retrancher plusieurs *corollaires* ou conséquences qui compléteraient la solution générale ; mais ceux qui veulent approfondir cette matière consulteront la *Mécanique de Bossut*, indiquée ci-dessus, ou autres ouvrages de ce genre.

De la vitesse dans la descente des corps.

993. Un corps pesant descend sur un plan incliné avec un mouvement uniformément accéléré. En effet, il doit descendre suivant la même loi que les corps graves qui tombent verticalement, avec cette seule différence qu'il descend avec une pesanteur moindre, et que, pour cette cause, toute sa marche est proportionnellement plus lente, mais en conservant les mêmes rapports.

994. D'où il suit : 1° que les espaces de la descente verticale étant en raison doublée des temps, de même qu'en raison doublée des vitesses, les espaces parcourus en temps égaux sur un plan incliné, quoique plus longs que dans la descente verticale, croissent toujours entre eux, comme les nombres impairs 1, 3, 5, 7, 9, etc., enfin suivant les mêmes rapports que ceux d'un corps tombant librement par la verticale; 2° que l'espace parcouru par un corps qui descend sur un plan incliné est sous-double (moitié) de celui qu'il parcourrait immédiatement après, dans le même temps et avec la vitesse acquise à la fin de sa chute.

995. Ainsi, généralement, les corps pesants descendent sur des plans inclinés, suivant les mêmes lois que s'ils descendaient perpendiculairement. Cette raison détermina *Galilée*, qui voulait découvrir les lois du mouvement des corps dont la chute est perpendiculaire, à faire ses expériences sur des plans inclinés, parce que le mouvement y est à proportion plus lent, et d'autant mieux susceptible d'appréciation; il en a déduit plusieurs théorèmes analogues aux suivants, auxquels nous nous bornerons ici. On en trouvera la suite dans les ouvrages spéciaux.

996. Si un corps pesant descend sur un plan incliné, sa vitesse, à la fin d'un temps donné quelconque, est à la vitesse qu'il acquerrait en tombant verticalement dans le même temps, comme la hauteur du plan incliné est à sa longueur.

Deux poids inégaux D, E, fig. 7, qui tirent l'un sur l'autre par la poulie A, et tendent à glisser sur deux plans inclinés de même hauteur, adossés en AB (ces plans ayant une inclinaison différente), seront en équilibre entre eux, si leurs poids sont l'un à l'autre comme les longueurs des bases de leurs plans; et le poids E, quoique moindre que celui D, tendra à descendre avec autant de force que D, parce que le plan AF soutiendra moins E que le plan AC ne soutiendra D, etc. Mais nous bornons ici ces développements, qui doivent être étudiés ailleurs.

997. Si le diamètre AB d'un cercle, fig. 6, est perpendiculaire à la ligne horizontale LBM, un corps descendra d'un point quelconque de la circonférence DE, le long des plans inclinés DB, CB, EB, etc., dans le même temps qu'il descendrait par le diamètre AB, ces plans étant d'autant plus courts qu'ils sont moins inclinés, et cela se déduit aisément des propositions précédentes.

998. L'ascension des corps sur des plans inclinés suit les mêmes lois, mais dans un ordre inverse : le mouvement alors est *uniformément retardé*.

999. En effet, si un corps descend verticalement d'environ 15 pieds pendant la pre-

mière seconde, comme le confirme l'expérience; ensuite de 45 pieds dans la deuxième seconde; de 75 pieds dans la troisième; de 105 pieds dans la quatrième (toujours en raison doublée de la quantité précédente, mais en y joignant sa force acquise), ce même corps étant lancé verticalement en hauteur avec la même force finale qu'il avait acquise à la fin de sa descente, parcourra en montant 105 pieds dans la première seconde, 75 pieds dans la deuxième, 45 pieds dans la troisième et 15 pieds dans la quatrième. Après quoi, ayant perdu toute sa force dans ce ralentissement (produit par l'attraction terrestre, comme son accélération en descendant), il recommencera à tomber suivant la même loi; et, comme il en est de même sur deux plans inclinés opposés, il en sera aussi de même dans un cercle ou autre courbe; le corps y acquerra par sa chute une force propre à le faire remonter du côté opposé du cercle ou de la courbe à la même hauteur d'où il est tombé, comme nous le verrons dans l'article de la théorie du *pendule*, où nous tiendrons compte toutefois de la résistance, soit du milieu ambiant, soit de la suspension, etc., et dans quelques autres articles que les propositions exposées ici sont destinées à éclairer.

« Car, lorsqu'un corps se meut sur un plan, et qu'il rencontre un autre plan, il « est facile de voir, par le principe de la décomposition des forces, que sa vitesse le long « du nouveau plan est à sa vitesse le long du premier plan comme le *cosinus* de l'angle « des plans est au *sinus total :* donc la vitesse perdue est comme le *sinus verse* de « l'angle des plans. Or, si cet angle est infiniment petit, le *sinus verse* est un infini« ment petit du second ordre; ainsi, lorsqu'un corps se meut dans une courbe ou un « cercle, la perte de sa vitesse à chaque instant est infiniment petite du second ordre, et, « par conséquent, infiniment petite du premier ordre ou presque nulle dans un temps « fini. »

1000. Dans ce court passage de *d'Alembert*, un peu trop abstrait pour des éléments, mais que nous rapportons en passant pour nos lecteurs mécaniciens de profession, et pour les Horlogers mécaniciens qui en sentiront l'application, la supposition de la courbe ou du cercle formés d'un polygone d'un nombre infini de côtés, et dont les angles sont par suite infiniment ouverts, n'est employée que pour faciliter la solution, sans être prise à la rigueur, vu que la ligne courbe et le mouvement circulaire sont aussi continus dans leur espèce, que la ligne droite et le mouvement dans cette ligne. Toute ligne courbe est de sa nature incommensurable avec une ligne droite, parce que ces deux lignes, de nature essentiellement différente, n'ont point de mesure commune et directe. C'est, comme nous l'avons dit ailleurs (239, 257), la vraie difficulté de la cadrature exacte du cercle, où il y a même contradiction dans les termes.

1001. La descente libre des corps suivant des lignes courbes ne serait qu'une question purement physique, relative à la gravitation et sortant des limites de ces notions élémentaires; mais elle devient importante en Horlogerie pour la théorie du *pendule*, comme on pourra l'apercevoir plus tard. Elle intéresse rarement d'ailleurs dans les machines ordinaires, parce que les corps en action sont maintenus par leurs centres de mouvement et dominés par des forces mécaniques très-prépondérantes relativement à la masse

propre des pièces qui ne sont pas livrées aux lois de leur simple pesanteur; leur action sur des plans inclinés est la plupart du temps momentanée, et s'exerce sur des surfaces de peu d'étendue. La pratique peut alors considérer l'effet total comme résultat en masse des diverses directions successives à l'égard des différents points de contact. Dans les échappements de l'Horlogerie, les inclinaisons diverses des plans de levée, à l'égard de la résistance, ou celles de la puissance sur les *plans de levée*, la forme de ces plans, etc., ont leur importance comme force, frottement, chute, conservation, etc.; mais quelques artistes habiles et instruits sont d'avis que les différences d'une action qui se décompose à chaque point de la levée et dans un instant très-court peuvent très-bien être prises en masse et pour résultat total sur les arcs si peu étendus de la levée, en comparaison des grands arcs complémentaires, comme dans les échappements de Montre produisant de grandes vibrations du balancier, où l'action n'a d'influence que par sa force totale résultant de l'action sur la levée. Ils pensent donc que l'analyse de cette action pendant sa durée est aussi difficile qu'inutile dans la pratique; que, pour choisir la forme, soit des levées, soit des plans inclinés qui opèrent ou reçoivent l'action, il faut s'en rapporter pratiquement à l'expérience pour adopter celle qui produit au total les plus grands arcs supplémentaires, sans considérer en détail les rapports pendant la levée entre les degrés d'arc parcourus par le balancier et ceux décrits par la roue. Mais qu'il peut n'en pas être de même dans le mouvement lent de la levée du pendule décrivant de petits arcs avec peu de supplément, comme dans celui encore plus lent de l'action continue des engrenages; car les pressions, qui agissent alors seules et longtemps, peuvent exiger des courbes propres à régulariser la menée, comme sont dans les rouages d'Horlogerie les courbes cycloïdales ou, à leur défaut, les arcs de cercle d'un rayon bien approprié, et qui, convenablement appliqués, remplacent très-bien ces courbes cycloïdales et sans inconvénient sensible.

Du recul des corps par l'effet du plan incliné.

1002. Il arrive souvent en mécanique, et par suite dans l'Horlogerie, application continuelles des mêmes principes *généraux*, que, au lieu d'avoir à observer les lois du mouvement des corps sur des plans inclinés fixes, il faut au contraire faire mouvoir le plan incliné contre le corps, soit pour en soulever le poids, soit pour en écarter la masse, et vaincre enfin avec plus ou moins d'effort la résistance opposée par ce corps au mouvement d'un plan incliné. Ces derniers effets peuvent être obtenus, et la question peut être résolue bien plus simplement que celles qui précèdent, mais toujours comme conséquence des principes développés ci-dessus, et dont la connaissance préalable était d'ailleurs nécessaire.

1003. Soit, fig. 9, la pièce AB chargée de poids ou de fonctions en résistance, et à mouvoir en hauteur; soit aussi le plan incliné CED susceptible d'avancer, par un mouvement horizontal de D en E, sous l'extrémité B à soulever; la puissance appliquée en CD sera à la résistance, pour lui faire équilibre, comme la hauteur DC du plan incliné est

à la longueur de sa base DE; et une augmentation quelconque de la puissance (augmentation proportionnée aux frottements) vaincra l'inertie ou la résistance de la partie BA. Ainsi, plus DC sera petit, relativement à DE, ou plus l'angle DEC sera aigu, plus il aura de facilité à soulever ou écarter la résistance; et par conséquent la puissance nécessaire en DC sera d'autant moins grande, quel que soit le sens du mouvement à produire, pourvu que, dans les différentes positions, la résistance soit la même. On fait abstraction ici toutefois des frottements divers des mobiles, très-considérables dans certaines grandes machines; mais on les réduit souvent par l'emploi des rouleaux, tels *fghii*, etc., qui facilitent beaucoup le mouvement.

1004. Dans les pièces délicates d'Horlogerie, le moyen des rouleaux est plus rarement praticable. On y a, la plupart du temps, à faire agir des parties angulaires ou étroites, de forme déterminée, qui ne permettent nullement l'adjonction si favorable de ces rouleaux. Il y a plus, c'est que l'emploi des rouleaux dans les parties animées par des forces très-légères est plus nuisible qu'il n'est utile. Le développement, même à sec, de la circonférence unie et polie d'un rouleau sur une surface préparée et soignée de même, donne lieu avec le temps à des adhérences *variables*. Il s'y produit un collement des surfaces qui occasionne une résistance inégale. L'emploi de corps gras interposés y serait encore plus nuisible. Cet effet devient très-sensible dans les échappements, et surtout à l'égard des points de contact qui se séparent perpendiculairement, quoique ces points y soient sans huile. Le glissement médiocrement allongé des parties frottantes y réussit mieux, même avec un corps onctueux, et la résistance totale y est beaucoup moins inconstante. Aussi, en pareil cas, on préfère que l'une des parties frottantes soit garnie de pierre fine et dure, bien polie, ou soit au moins d'acier trempé, non pas alors poli au dernier degré, mais parfaitement adouci, ce qui est préférable pour les métaux, comme constance de frottement, car les parties métalliques très-polies qui frottent ne se conservent pas longtemps telles, et il s'y forme bientôt un adouci que l'on peut établir d'avance, pour éviter la différence des premières épreuves aux dernières. Avec les pierres dures et bien polies, on adopte presque toujours l'entremise des corps gras, qui garantit les surfaces et même les pierres de l'usure à laquelle elles seraient exposées à sec, surtout en contact avec l'acier, sauf à renouveler le corps gras plus ou moins fréquemment.

Du coin.

1005. On distingue d'avec le plan incliné simple, dont nous nous sommes occupé jusqu'ici, celui à double face, où la double inclinaison a ses bases supposées réunies, et qu'on appelle *coin*. Ici, comme dans le cas précédent, plus l'angle est aigu et plus le coin a de puissance; mais cette *acuité* est bornée par la dureté et la résistance de la matière à pénétrer ou à séparer. Comme le frottement est très-considérable et aussi variable que la nature des matières, il en résulte qu'on ne peut guère estimer théoriquement la puissance nécessaire pour vaincre la résistance. Cette puissance rentre bien dans les conditions générales du plan incliné simple, avec sa seule différence d'un double effet; mais

la puissance est appliquée ici d'une tout autre manière, c'est-à-dire par la *percussion*, dont la force dépend de la progression continue d'une première puissance appliquée au marteau ou au maillet, en un mot, à la masse qui frappe le coin. Quant à la puissance agissant directement sur le coin, composé de la force croissante et accélérée, de l'espace parcouru, et de la vitesse, dont une partie est presque toujours incertaine, surtout lorsqu'il s'agit de forces humaines, cette puissance résulte d'une combinaison difficilement appréciable. Quelques auteurs pensent que l'ébranlement et les vibrations internes des molécules du coin et des parties à écarter ou à presser contribuent beaucoup à la progression du coin. On remarque, en effet, qu'un poids en repos, capable d'une pression qui paraît beaucoup plus considérable que la force supposable d'un fort marteau et des moyens qui le mettent en mouvement, ne fera pas entrer dans un bois dur, par la simple pression, un gros clou que les coups, même modérés, du même marteau y introduiront assez facilement.

1006. Si le frottement du coin est très-considérable, il devient, d'un autre côté, très-utile pour retenir le coin en place à mesure de sa progression. Aussi l'effet du coin ne peut-il réussir quand les deux plans inclinés forment un angle trop ouvert. Le coin recule alors, par la réaction élastique de la matière, avec autant de force qu'il est entré, et ce ne serait pas sans danger, si l'on ne prenait pas des précautions à cet égard, à moins que les effets des proportions du coin employé ne fussent bien connus d'avance. Dans tous les cas, il ne doit jamais être graissé. Le frottement qui accompagne les effets du coin y tien lieu d'une sorte d'encliquetage propre à le retenir en place à chaque degré de sa progression, pendant l'intermittence inévitable des coups qui le font pénétrer. Les clous ordinaires ne sont retenus dans les trous qu'ils forment par les coups de marteau qu'au moyen du frottement et de l'élasticité de la matière qu'ils ont écartée, et qui les presse continuellement.

1007. Le coin frappé par une masse développe une grande puissance dans un espace très-resserré; il sert à fendre de fortes pièces de bois, et même des pierres dures, au moyen de trous multipliés et pratiqués d'abord dans ces dernières, et remplis ensuite de bois sec, où l'on introduit des coins de fer à grande force : il suffit alors de bien mouiller le bois pour produire une séparation dans des masses énormes. Cette opération se pratique de proche en proche sur une ligne voulue. On y parvient aussi en pratiquant une rainure sur la même ligne, par la seule dilatation que produisent des charbons allumés sur toute la ligne et l'arrosement d'eau froide substituée immédiatement au charbon. L'introduction subite de l'eau dans le corps échauffé produit l'effet d'une quantité presque infinie de coins, qui parviennent à en opérer la séparation. Le coin sert à soulever la quille des vaisseaux dans les chantiers de marine, et à extraire dans les pressoirs l'huile des graines concassées et pilées préalablement, et renfermées dans des sacs de crin; elles y sont comprimées par des coins de bois dur, introduits et serrés par la chute de poutres très-pesantes et tombant debout. L'extrême pression des matières les rend alors presque aussi compactes que le bois, etc. Plusieurs instruments tranchants réunissent l'effet du levier à celui du coin, et l'acuité de ce

dernier y est proportionnée à la dureté de la matière à séparer. Les instruments propres à couper le bois ont l'angle de leur tranchant d'environ 30°; pour couper le cuivre, l'angle du ciseau est de 50° à 60°; pour le fer, il est de 80°.

De la vis.

1008. Il serait superflu de s'étendre ici beaucoup sur la description de la *vis*, si généralement connue et suffisamment développée dans le dernier article de nos définitions préliminaires, première partie, p. 48 et suivantes. Nous nous bornerons à faire observer que le filet de la vis, étant un plan incliné circulaire, au lieu d'être disposé en ligne droite, comme les plans traités précédemment, peut être tracé en grand, au moyen de la surface flexible d'un plan incliné et en ligne droite, tel que celui de la figure 13, et en appliquan cette surface sur le cylindre dont on veut former une vis. On obtient aussi sur le cylindre une ligne circulaire rampante qui détermine la direction d'un côté du filet. Dans cette figure 13, où l'effet a dû être rendu plus sensible, le filet trop incliné serait plutôt ici celui d'une vis sans fin de volant, mue par une roue dentée; mais pour une vis à filets fins et serrés, la base du plan moins incliné aurait occupé presque toute la longueur de la planche. Le filet est ensuite isolé de ceux qui le suivent et le précèdent, par divers procédes convenables à la matière, à la dimension du cylindre, etc., et ces détails seraient ici déplacés. Ce tracé ne se pratique donc que pour de grosses vis, car, pour celles usuelles et ordinaires qui servent à des assemblages, nous avons indiqué déjà à l'article, cité des définitions, qu'elles sont en partie moulées en quelque sorte, et en parties évidées par la pression et le mordant d'une filière à coussinets. Les très-petites vis d'Horlogerie ont leurs filets uniquement imprimés dans le métal amolli d'abord par le recuit, et refoulé par la filière commune sans coussinets. Nous n'entrerons pas dans ces détails parce qu'il ne s'agit principalement ici de la puissance de la vis que comme pression, et qu'alors cette puissance s'exprime par le rapport de la hauteur verticale du plan incliné, censé avoir servi à la tracer, comparée à la longueur de la base qui embrasse un premier tour, dont les tours suivants ne sont qu'une répétition continuée aux différentes hauteurs de chaque filet. La puissance s'estime donc ici comme pour le plan incliné droit, et suivant les mêmes rapports. Cependant il faut prendre la longueur du plan d'après 3 diamètres moyens, tels que celui qui correspond à la moitié de la saillie ou épaisseur du filet, aux deux extrémités diamétrales. L'effet de la vis se produit au moyen d'un levier qui la fait tourner, et ce levier est représenté, pour les petites vis, par le rayon du manche d'un *tourne-vis*, et pour les fortes vis, par un véritable levier ou tige de fer engagée dans des trous ou des ouvertures de la tête de vis, ou ajustée comme le boulon d'une vis d'étau fixe. (V. figure 10.)

1009. Le filet d'une vis reçoit assez généralement et selon les cas, l'une des formes suivantes : la forme carrée, comme celle de la figure 10, pl. XXIII, présente à la résistance un plan (horizontal dans le sens du rayon), ayant pour largeur toute la saillie du filet, sur le cylindre restant à l'intérieur et formant le noyau ou l'axe de la vis. D'autres

vis ont les angles de leur filet arrondis extérieurement en demi-cercle, et les vides sont également arrondis au fond, suivant la figure 11. Le principal appui de la résistance y a lieu sur une ligne plus étroite, entre les deux arrondis, mais le mouvement de l'écrou y est plus facile, et la résistance y est aussi forte, si elle ne l'est pas même un peu plus ; d'un autre côté, l'usure de la surface s'opère un peu plus vite; cette forme paraît convenir mieux aux vis qui marchent peu et doucement. Enfin la forme du filet peut être triangulaire ou prismatique, et sa surface d'appui est oblique au rayon du dedans au dehors, indépendamment de la pente du plan incliné primitif, comme dans la figure 12. Or le choix entre ces diverses formes dépend de l'intensité d'effort que la vis doit éprouver. La forme carrée éprouve un frottement plus doux, parce qu'il a lieu sur une surface plane et sans engagement; mais il offre moins de solidité, vu que l'effort direct de la résistance suivant la longueur de l'axe tend à détacher le filet de son noyau, par une solution de continuité qui s'opère souvent lors des trop grandes pressions sur l'écrou des étaux, dont le filet est ordinairement de rapport et brasé dans l'écrou. La forme triangulaire donnée au filet de la vis, comme à celui de son écrou (que l'on sait devoir être toujours conforme à la vis), tend par sa pente, à l'égard du rayon, à presser fortement le filet contre la matière du noyau, ce qui rend la solution de continuité plus difficile ; mais comme la forme du filet s'engage ainsi dans une sorte d'entonnoir, vu la forme semblable du filet de l'écrou, le frottement y est sensiblement augmenté. Cette forme triangulaire paraît mieux convenir dans les cas de choc brusque, tendant à arracher directement l'écrou ou la vis, comme celui que le jeu latéral des roues d'un chariot chargé, lesquelles glissent de côté sur des pavés arrondis, fait éprouver aux écrous de son essieu. Ces écrous doivent être très-serrés sur une portée qui termine la partie filetée. Les pas de l'essieu doivent aussi être *à droite* pour la roue de droite de la voiture, et *à gauche* pour l'autre côté, afin que le sens du frottement du moyeu tende plutôt à serrer l'écrou contre la portée. Cet écrou reste d'ailleurs assez longtemps fixe, et ne se démonte que pour graisser la boîte du moyeu et la tige de l'essieu. Ce graissage s'opère souvent par divers moyens sans démonter la roue. Il en résulte qu'on ne craint pas le frottement de l'écrou sur sa vis, frottement que l'on doit même tenir assez dur pour qu'il se desserre plus difficilement.

1010. Il n'en est pas de même des vis et écrous exposés à un va-et-vient fréquent ou continuel. La vis d'un balancier de monnayage, d'une presse d'imprimerie, ou pour d'autres effets analogues, a ses filets carrés, pour qu'elle se meuve sans engagement dans l'écrou, en y prenant une progression rapide. La forme triangulaire serait sans doute plus solide pour résister au choc du poinçon contre la pièce de monnaie qu'il frappe, mais d'un autre côté ces vis doivent reculer facilement, sans s'engager ; elles sont d'ailleurs formées de trois à quatre filets entrelacés exactement, qui descendent et résistent tous à la fois.

1011. Dans les vis de pression ordinaire, ou plutôt d'assemblage, le filet est plus communément arrondi au dehors et au dedans, ou bien il est assez indifféremment triangulaire; mais, dans tous les cas, il convient toujours que la profondeur du filet creux dépasse

sensiblement sa hauteur, dans la vis comme dans l'écrou, avec la liberté nécessaire pour tourner aisément, liberté qui d'ailleurs s'établit assez et souvent trop par l'usage. Il résulte de cette profondeur recommandée du creux du filet, plus d'assiette pour l'appui et pour suppléer à ce qui peut s'en perdre par le jeu latéral. Dans les filières mal faites, le filet a souvent moins de profondeur que de hauteur, et le défaut d'assiette suffisante pour résister à l'effort finit par user et refouler les filets, principalement ceux du laiton, moins ferme que l'acier, ce qui détruit les pas, et produit ce qu'on appelle *faire vis sans fin*. Quant à la véritable *vis sans fin*, proprement dite, destinée à faire mouvoir une roue dentée, ou à être mue par cette roue, nous en avons déjà suffisamment expliqué l'emploi dans l'article cité des définitions; on peut y ajouter que, si la roue doit mener la vis sans fin, celle-ci doit avoir deux et jusqu'à trois filets entrelacés, suivant la rapidité voulue, afin qu'ils glissent facilement sous la pression de la roue, et toujours à l'aide d'un corps gras; la forme du filet dans ce cas, et celle des dents de la roue, seront du reste données à l'article des engrenages.

1012. Le rapport ordinaire d'égalité, entre le plein et le vide du filet d'une vis tournant dans un écrou de même matière, souffre des modifications quand il y a différence de matière; ainsi la vis d'acier est plus vide que pleine avec un écrou de laiton fondu qui a moins de ténacité, et s'use davantage; les vis en fer pour le bois sont encore plus vides, etc.

1013. Nous rappellerons ici un emploi ingénieux de la vis, pour la haute pression, et qui porte le nom de vis de *Hunter;* elle réunit la puissance d'un plan très-peu incliné avec la force conservée au filet. Avant cette combinaison, on n'obtenait la puissance par le plan peu incliné qu'avec un filet très-fin, sans solidité, d'une exécution difficile, et sujet à être détruit au moindre effort.

1014. La disposition de *Hunter* consiste en deux vis d'inégal diamètre, appliquées à une presse ordinaire. La plus grosse vis est un tube à parois épaisses, fileté en dehors, et taraudé en dedans, et y recevant la deuxième vis pleine, filetée du même sens, et d'un diamètre d'autant moindre. Quand la grosse vis descend de l'écrou du sommier supérieur de la presse, sa partie inférieure recouvrant une portion de la moindre vis continue à se visser sur celle-ci; cette moindre vis inférieure est fixée sans pouvoir tourner sur le plateau mobile qui doit presser les objets à comprimer. Dans cet état, si les filets des deux vis étaient de même progression, en faisant descendre la grosse vis de son écrou du haut, son canon taraudé recouvrirait d'autant la vis inférieure, le plateau resterait immobile et il n'y aurait pas de pression. Mais l'artifice principal consiste en ce que la vis inférieure d'un moindre diamètre et le tube qui lui sert d'écrou ont leurs filets un peu plus rapprochés que ceux extérieurs de la grosse vis dans l'écrou du haut; il en résulte que pour le même nombre de tours, la grosse vis descend d'un plus grand espace que celui qu'elle recouvre sur la petite vis, et qu'elle pousse celle-ci en contre-bas, de la différence de leur progression; or, cette différence pouvant être très-peu sensible, le mouvement du plateau se trouve être celui d'une vis de très-faible progression opérant par un plan très-peu incliné et développant d'autant plus de puis-

sance, tandis que, cependant, les filets de chaque vis peuvent être d'une très-forte proportion matérielle et d'autant plus solides. Les pas de deux vis peuvent en effet être très-gros et très-rapides, sans que le plateau de pression en descende plus vite, puisque sa pression ne dépend plus que de la très-légère différence de progression entre les deux vis.

1015. Cette idée est heureuse, mais la première construction donnée par l'auteur ne l'était pas autant, en ce que le tube de la grosse vis fileté en dehors et taraudé en dedans pouvait aisément se crever dans les grandes pressions. On ajoute que l'auteur a corrigé ce défaut par la substitution d'une seule tige pleine, filetée en dehors d'un bout à l'autre. Le traducteur ne donnant pas la figure de cette correction, nous y avons suppléé par la construction appropriée de la figure 14, pl. XXIII, qui laisse toujours à l'auteur le mérite d'en avoir créé l'idée principale. L'inspection d'une figure aussi simple nous dispensera de sa description, que l'on concevra de reste par l'usage suivant.

1016. Le filetage en même sens des deux vis de la même tige étant séparé en deux parties par le *tambour* C, on en arrête le mouvement par un levier introduit dans les trous de C, et appuyant sur l'une des *jumelles* ou montants. On descend seulement l'écrou ou boîte AB roulant librement dans son emboîtement, pointillé au travers de l'épaisseur du plateau de pression qui est au-dessous de DE. On produit ainsi une forte pression ordinaire au moyen d'un levier et des trous en DE. A ce point, la portion de vis G doit rester pénétrant au moins jusqu'aux deux tiers de la boîte solide ABDE. Si le bout de la vis se trouvait plus haut, on desserrerait la boîte pour faire descendre la portion de vis E de l'écrou supérieur, et on l'arrêterait comme ci-dessus. La pression de la boîte DE étant donc arrivée à son maximum, jusqu'à refus de tourner davantage, on achèvera d'augmenter la pression en ne faisant plus tourner que le tambour C, au moyen de son levier et des trous de cette partie ; celle-ci, descendant de très-peu plus vite de l'écrou du sommier F qu'elle n'entre dans l'écrou de la boîte A B, par suite de leur peu de différence de progression, agira alors comme un plan très-peu différent d'une ligne horizontale, et avec une puissance d'autant plus avantageuse. La différence de progression des deux vis a été rendue plus sensible dans la figure qu'elle ne doit l'être en réalité, et l'on conçoit qu'en la réduisant beaucoup, on peut obtenir presque autant d'effet qu'avec la presse hydraulique, dont on connaît l'énorme puissance, en donnant toutefois aux parties de la presse actuelle la solidité requise, et qu'au total sa construction serait beaucoup moins dispendieuse, même en voulant faire produire à cette vis tout autant d'effet qu'à la presse hydraulique.

1017. Le principe de cette disposition est applicable en petit comme en grand, non-seulement comme moyen de haute pression, mais même comme progression aussi lente que l'on voudra ; et s'il peut être avantageux comme puissance en mécanique générale, c'est encore sous le second rapport de progression réduite qu'il peut servir en Horlogerie pour les outils compliqués dont elle s'aide, comme dans les instruments où l'on emploie des vis dites *micrométriques ;* car une tige peut aisément être filetée du même sens sur

ses deux extrémités et avoir un côté d'une progression différant infiniment peu de celle de l'autre côté. Or, si le bout de plus forte progression est engagé dans un écrou fixe, l'autre bout de moindre progression peut, en faisant tourner leur tige commune, faire avancer d'une quantité presque insensible, à chaque tour, un autre écrou mobile dans une coulisse ; si la tige porte un limbe divisé, on peut obtenir ainsi la progression de mouvement la plus minime, pour l'écrou mobile, pourvu que les deux écrous suffisamment longs aient été bien régularisés, ainsi que les vis, par le rôdage ou par d'autres moyens connus, et qu'enfin l'ensemble de la construction ait toute l'exactitude requise dans l'exécution.

1018. Les constructeurs d'instruments de précision ont, pour faire ces vis, des outils spéciaux qui les taillent géométriquement : une règle bien droite placée de manière à former un plan plus ou moins incliné et mobile, y fait avancer un burin qui coupe le filet, tandis que le cylindre à fileter tourne sur lui-même sans se déplacer. C'est ainsi que sont formées les vis sans fin qui mènent des plates-formes, pour diviser et fendre les dentures des rouages. La meilleure construction de l'outil à tailler les *fusées* est analogue à celle de l'outil à tailler régulièrement les vis.

1019. Les fortes vis en bois dur des pressoirs sont établies au moyen d'un calibre formé d'un plan incliné que l'on trace droit sur une tôle mince, et que l'on courbe en l'appliquant sur le cylindre à tailler en vis, comme l'indique la figure 13, qui s'explique assez à la vue sous ce rapport. On y voit que le plan incliné, s'il était roulé sur le cylindre, auquel il est accolé ici, pourrait former quatre tours et demi, et la trace de ce plan incliné est indiquée sur un cylindre semblable figuré à côté du précédent. On ébauche les grosses vis en bois au ciseau, et on les régularise dans une sorte d'écrou garni intérieurement d'une lame tranchante qui achève d'enlever les petites aspérités ; l'écrou de la vis s'exécute aussi par des procédés analogues. Mais les grands établissements qui confectionnent les machines exécutent aujourd'hui ces grosses vis en fer d'un bien moindre diamètre, et aussi fortes que celles de bois ; elles glissent mieux et avec moins de frottement et d'accidents. Les vis en bois ont d'autant plus de frottement que le filet y est nécessairement triangulaire, comme moins sujet à éclater.

De quelques autres puissances mécaniques.

1020. Il a été traité ci-dessus de quatre machines simples dites *puissances mécaniques* telles que le *levier*, le *plan incliné*, le *coin* et la *vis ;* on range sous la même dénomination le *cabestan*, et le *treuil* ou *vindas*, qui rentre dans le genre du premier ; enfin la *poulie* seule, ou multipliée dans la *moufle*. Il est évident que ces dernières puissances, qu'on nomme aussi *funiculaires*, parce que la *corde* (*funis*) y est employée nécessairement, ne sont au fond, ainsi que les *roues dentées*, que des combinaisons de leviers auxquels les cordes servent de communication. Nous avons déjà dit que les grandes machines compliquées se composent de ces premières machines simples, ou *puissances mécaniques*, lesquelles se réduisent définitivement à deux éléments, le *levier* et le *plan*

incliné. Aussi avons-nous cru devoir nous étendre sur ces deux principaux articles, parce que, bien compris, avec toutes leurs distinctions et conséquences, ils donnent la *clef* de toutes les autres machines. Nous allons donc passer rapidement sur les trois autres machines simples énumérées ci-dessus, et assez généralement connues pour ne pas exiger de figures.

1021. La *vapeur*, si fréquemment employée aujourd'hui, ne forme pas une machine; mais une *force motrice* appliquée à une machine quelconque. On sait que l'eau réduite en vapeurs par le feu y meut avec une force prodigieuse, par des pistons de pompes, d'autres puissants mobiles, ouvre et ferme le passage à la vapeur par des robinets, etc. Mais le principe et les effets de cette puissance se rattachent plus aux sciences *physique* et *hydro-dynamique* qu'à celle proprement appelée *mécanique*.

1022. Le *cabestan* se compose d'un axe court et d'un fort diamètre, placé verticalement et roulant sur deux gros tourillons, dans les collets horizontaux d'un châssis de charpente fixé, soit à terre par des coins enfoncés dans le sol, soit par des cordages sur le pont d'un navire. L'axe ou l'arbre, principale et presque unique partie essentielle de cette machine, est plus gros du bas que du haut, et d'une forme conoïde courbe et rentrante, analogue à celle d'une cloche extrêmement allongée. Le haut de l'arbre, ou le tourillon est beaucoup plus gros que celui du bas, se termine par une tête de forte proportion, cerclée de fer, et percée de plusieurs mortaises, pour y recevoir les bras de longs leviers. Des forces humaines et quelquefois celle des chevaux appliquées à ces leviers, produisant au moyen d'un *câble* enroulé sur l'axe une puissance capable de tirer, traîner, ou enlever au moyen de poulies de renvoi, des masses d'un très-grand poids. Le câble provenant de l'objet à mouvoir fait quatre ou cinq ou six tours sur l'arbre en commençant sur le plus fort diamètre, et le bout qui sort à mesure de l'autre côté est tiré fortement à bras, pour maintenir les tours serrés et en frottement sur l'arbre, ce à quoi contribue le glissement des tours de cordes pressées les unes contre les autres par l'inclinaison de la surface de l'axe plus gros du bas; leur adhérence suffit pour vaincre de très-grands obstacles. C'est avec le cabestan que l'on tire à terre les petits navires pour les radouber, qu'on lève les ancres, que l'on hisse les vergues, que l'on cargue les voiles des grands bâtiments, qu'on décharge les plus lourdes marchandises, que l'on soulève d'énormes pierres dans les ports. On emploie aussi dans les ports des *grues* garnies de chaînes de fer en place de câbles, lesquelles sont enroulées sur un tambour ou cylindre mû par plusieurs engrenages, avec manivelles à bras, etc. Le cabestan sert aussi à traîner de lourds fardeaux sur terre, au moyen de coulisseaux savonnés (1).

(1) C'est avec des moufles et des *cabestans* multipliés, mus par des hommes et des chevaux, que l'on a érigé à Rome les plus grands obélisques, qu'on les a suspendus en l'air horizontalement, qu'on les a virés sur leurs câbles, et qu'ensuite on les a descendus verticablement sur leurs piédestaux sans ébranler ceux-ci, en sorte qu'on a pu les poser rigoureusement d'aplomb. Le principal et le meilleur effet pittoresque de ces monuments est de couper par une ligne exactement perpendiculaire les lignes horizontales ou fuyantes des fonds d'architecture. C'est ainsi que la grande colonne d'*Alexandre*, d'un seul bloc de granit rouge foncé de Finlande, a été érigée à Pétersbourg par M. *de Montferrand*, habile et savant architecte français. Mais, comme il arrive d'ordinaire chez les nations hyperborées, les sculp-

1023. Le *treuil* est une sorte de tour approchant de l'espèce du cabestan, mais dont l'axe entièrement cylindrique et horizontal est assez long pour s'envelopper de toute la corde dont un bout y est fixé ; il porte une grande roue verticale garnie à sa jante de chevilles que l'on meut à bras pour extraire des pierres ou des matériaux, par les puits d'une carrière, d'une fouille, etc. En place de la roue, il portait anciennement un tambour, autour duquel une corde enroulée faisait mouvoir le tout. De là lui vient son nom latin, *axis in peritrochio*, axe dans le tambour.

1024. Le *vindas* ne diffère du treuil que par une manivelle qui remplace la roue, et s'emploie assez communément à tirer l'eau des puits. La puissance de ces machines simples s'estime par le rapport entre le rayon du cylindre et celui de la roue ou de la manivelle, sauf le frottement à déduire ; on y joint avec avantage un volant.

1025. L'instrument *funiculaire* si connu, la *poulie*, est formé d'un disque épais exactement rond, et dont le centre percé roule sur un axe soutenu par ce qu'on nomme la *chape* accrochée à un point fixe ; l'épaisseur du disque porte une rainure angulaire, ou plus que demi-circulaire, pour recevoir la corde qui s'y développe; c'est ce que chacun sait de reste, mais il n'en est pas toujours de même de ce qui suit :

1026. Si une seule poulie ainsi suspendue à un point élevé reçoit une corde dont un bout est attaché à un poids dans le bas, et si l'autre bout est tiré verticalement aussi d'en bas par une puissance quelconque, on conçoit aisément que la puissance doit exercer un effort équivalent au poids, pour lui faire équilibre, puisque le diamètre horizontal de la poulie représente un levier de la première espèce, à bras égaux, et dont les extrémités tirées par deux forces égales ont leur point d'appui au centre du levier, qui est celui de l'axe de la poulie. Pour mouvoir le poids, il suffira d'ajouter à la puissance un peu plus que la quantité nécessaire pour surmonter le frottement de la poulie sur un axe fixe, et la *résistance de la corde à se ployer ;* hormis cela, l'axe de la poulie supportera un effort égal au double du poids donné.

1027. Mais si la poulie est accrochée au poids lui-même, au bas de l'espace qu'il doit parcourir, et si, un bout de la corde étant attaché à un point élevé, l'autre bout est tiré verticalement dans ce même lieu élevé, l'effet est différent : le levier devient alors celui de seconde espèce, où la puissance et le point d'appui sont aux deux extrémités, tandis

tures du haut et du piédestal ne répondent pas tout à fait à la hardiesse de l'exécution. La colonne *Bonaparte*, à Paris, est un monument digne de la belle époque des Arts de la Grèce, par la richesse et le mérite de sa sculpture; celle d'*Alexandre*, par sa masse colossale, en est un digne de la puissance romaine. Le fût lisse et plein de ce monolithe est de la même dimension que celui de la colonne de la place *Vendôme*, et a été érigé suivant l'excellente méthode du célèbre *Fontana*, architecte romain. Aussi la colonne d'Alexandre a-t-elle reçu et conservé une verticalité parfaite et indispensable. De tels travaux de décor, comme le choix de l'emplacement, sont du ressort de l'*architecte* habile et expérimenté, qui peut ensuite au besoin s'adjoindre un ingénieur *mécanicien*. Ailleurs, faute d'une sage direction, un obélisque a, dit-on, été rompu ; un autre, ailleurs, a été posé hors d'aplomb, et même on aurait voulu le voir ériger en 40 ! ! ! Le temps et la nouveauté du moyen importent-ils donc plus que la sûreté de la méthode, que nous considérons principalement ici? Ne sait-on pas que les effets trop hâtifs de l'art, comme ceux de la nature, manquent toujours proportionnellement de durée, de solidité ou de perfection ?

que la résistance est au milieu, et n'oppose à la puissance que la moitié de son poids. Il s'ensuivra que, pour tirer le même poids d'en haut, il ne faudra plus que la moitié de la puissance, et que le point fixe d'appui du haut ne sera aussi chargé que de la moitié du poids.

1028. Le tirage vers le haut est plus fatigant que celui qui agit en contre-bas, parce que le premier s'opère uniquement par l'effort des muscles, tandis que dans le second les muscles sont avantageusement aidés par le propre poids du corps. Si donc la corde est assez longue pour passer dans le haut sur une seconde poulie de ce côté, elle pourra être tirée d'en bas, et avec une position plus avantageuse, puisque la poulie du haut ne fait que transmettre la résistance sans la changer (au frottement près). Mais si l'on fait passer encore la corde dans une autre poulie du bas, accrochée aussi au poids, pour la faire retourner vers le haut, la puissance n'aura plus à soutenir dans le haut que la portion supportée également par chaque partie de la corde. Une autre poulie du haut pourra encore ramener la corde en bas, pour la faire passer dans une troisième poulie du bas, et la remonter encore dans une troisième poulie du haut pour être définitivement tirée d'en bas. Il y aura dans ces retours de la corde six portions de corde ou six *cordons* de support, qui, par leur tension égale, se partageront la résistance du poids, en sorte que la puissance n'aura réellement à vaincre qu'un sixième de la résistance : si le poids est de 300 livres, il suffira de 50 livres pour lui faire équilibre; mais pour le mouvoir il faudra davantage, à cause du frottement des axes et de la résistance de la corde à se ployer pour peu qu'elle soit grosse ; on peut donc supposer qu'une force de 70 à 80 livres suffira pour en mouvoir 300 avec facilité. Cet effet est représenté dans les deux figures 7 et 9 de la pl. XXIV.

1029. Or, si l'on réunit les quatre poulies du haut dans une seule chape, on aura ce qu'on nomme une *moufle*, comme en A, figure 7, et on en pourra faire autant aux trois poulies du bas, comme en B, même figure, et l'on fera mouvoir le poids avec une *paire de moufles*. On a des moufles qui portent chacune jusqu'à dix poulies, sur deux rangs, dont cinq sur chaque rang, ce qui forme vingt cordons; en sorte qu'un poids de deux mille pourrait être tiré avec une puissance de cent livres. Mais comme il y a beaucoup de frottement et de résistance par les plis multipliés de la corde, on la fait tirer dans le bas par deux ou trois hommes, qui s'aident de leur propre pesanteur. Ce moyen est fréquemment employé dans la construction des édifices et ailleurs. On doit remarquer qu'il est plus avantageux d'attacher le premier bout de corde au-dessous de la moufle du haut on y gagne un cordon de plus. Comme cet attirail ne laisse pas d'être embarrassant par la longueur de la corde et par l'enchevêtrement des cordons qui sortent parfois des gorges, on préfère souvent l'usage de la *grue* droite (ou inclinée), très-commun dans les ports et dans les constructions; cette machine, portant dans le haut une sorte de potence mobile horizontalement, et garnie de deux poulies de métal, est munie dans le bas d'un axe ou cylindre, avec plusieurs roues d'engrenage, où les pignons mènent les roues avec un grand avantage de levier; le premier pignon y est mû par deux manivelles à angle droit entre elles, pour que les moments *critiques* de l'une soient sou-

tenus par les moments *avantageux* de l'autre. Quoique cet effet soit compris sous le nom général de *machine funiculaire* (car les chaînes représentent ici des cordes), nous devions au moins en mentionner le principal usage qui se varie de bien d'autres manières, et nous en tirerons même des conséquences qui intéressent l'Horlogerie, car elle emploie aussi des cordons, des chaînes et des poulies combinés, comme on le verra en son lieu.

1030. Nous terminerons ce sujet par une dernière observation sur l'usage des moufles. Dans les anciennes constructions, les poulies étaient placées les unes au-dessus des autres dans une longue chape de fer, comme figure 9, et leurs diamètres augmentaient à mesure qu'elles étaient plus rapprochées du point où est accrochée la moufle. On les a disposées ensuite sur une même ligne et sur un même rang dans chaque moufle, comme dans la figure 7, où elles sont seulement séparées par une cloison, comme aussi dans la figure 8, où il faudrait supposer de plus des rondelles entre les faces des poulies et leurs cloisons, afin que celles-ci ne frottent pas de tout leur diamètre. *Smeaton*, Anglais, les a disposées sur deux rangs, comme dans cette figure 8, où chaque rang le plus près du crochet d'attache pour la moufle est d'un diamètre plus grand que le second rang, afin que les cordons ne se frottent pas; les chiffres qui accompagnent la figure 8 y indiquent la route de la corde, à partir de l'anneau 10, situé vers le bord postérieur, et par 1, 2, 3, etc.; on peut aussi la disposer autrement.

1031. Dans ces divers *systèmes* (arrangements, ordres, dispositions), chaque poulie roule séparément sur son axe, et souvent est sujette à des frottements latéraux contre les cloisons, par le déversement qu'occasionne l'usure du trou central de la poulie; avec des diamètres égaux, les vitesses des poulies sont différentes, et généralement il y a beaucoup de frottement; celui-ci, joint à la roideur ou résistance de chaque cordon à se ployer, exige un surcroît assez considérable dans la puissance, quand les poulies sont très-multipliées; c'est ce qui fait préférer l'usage de la grue avec cylindre et engrenages, comme il a été dit, quoique cette dernière machine soit d'un établissement beaucoup plus dispendieux.

1032. Dans la moufle, tandis que la première poulie, à la suite du point d'attache de la corde, fait une révolution, la seconde poulie du même côté fait trois révolutions, la suivante en fait cinq, etc; et pour que toutes les poulies fissent leur révolution dans le même temps, il faudrait augmenter les diamètres en proportion des vitesses de chaque retour de corde. C'est en effet ce qu'on a tenté d'obtenir approximativement, en formant toutes les poulies d'une moufle d'un seul bloc, représentant, quant aux gorges seulement, plusieurs poulies de diamètre proportionnés aux vitesses, afin d'avoir moins de révolutions, et par suite moins de frottement. Cette disposition, proposée par *White*, est indiquée dans les figures 10 et 11, pl. XXIV, avec quelques détails que nous y avons ajoutés.

1033. On convient que cette construction réduit beaucoup le frottement, même avec la résistance de forts poids à mouvoir; mais on objecte que son utilité pratique est contre-balancée par un autre inconvénient, en ce qu'il est très-difficile de donner à

chaque gorge son diamètre précis, et relatif à celui de la corde, puisque celui-ci varie continuellement par l'usure ou le changement forcé de cette corde, et que, sans la précision des rapports, chaque poulie de cette construction ne pouvant tourner séparément des autres, la tension des cordons n'est pas égale ; or, quelques-uns restant lâches et quittant leurs gorges, ils produisent une confusion qui entrave le service de la machine; c'est pourquoi cette disposition ingénieuse n'a presque pas été employée. Dans l'original, les chapes de fer sont formées chacune d'un tirant simple avec son crochet, sans croisillons latéraux, et comme sa figure diffère peu à l'œil de la construction que nous allons proposer, nous n'avons pas cru devoir reproduire l'ancienne; sa différence d'avec la nouvelle figure actuelle sera aisément conçue par l'explication totale que nous en donnons ici. Au fond, le principal changement consiste à faire autant de poulies séparées, figurant le bloc d'une seule pièce de *White;* par ce moyen, qui changerait peu la somme du frottement, les diamètres étant les mêmes, les cordons également tendus resteraient mieux dans leurs gorges, où leur situation constante pourrait être assurée de plus par les deux croisillons latéraux AB, que nous ajoutons ici au tirant droit du milieu. Les parois intérieures de ces trois branches seraient disposées en échelons propres à retenir au besoin chaque cordon dans sa gorge, sur trois principaux points. L'échelonnage proposé ne peut être aperçu dans la figure 10, parce qu'elle est vue de face ; mais on peut en prendre une idée suffisante en C et C′, par profil du tirant droit du milieu de la chape, vue par le côté, fig. 11. Si les deux croisillons latéraux ne sont pas exprimés dans ce profil, où l'esprit les supplée aisément, d'après la figure 10, c'est afin de laisser voir dans la nouvelle disposition la division et la saillie réservée au centre de chaque poulie pour prévenir le frottement de sa surface entière. Les bras latéraux A et B de la chape, vus dans la figure 10, sont donc formés d'une seule branche inclinée vers l'arrière de la figure, d'où elle est repliée droit au centre, étant échelonnée vers les poulies, de même que la seule branche inférieure C ou C′ échelonnée du profil ; les croisillons latéraux n'ont pas besoin d'être à double branche, comme le tirant droit qui doit, lui, porter le crochet dans le milieu de la masse. Au lieu de ces croisillons, des planches triangulaires d'une forte tôle, séparant et dépassant les poulies, retiendraient peut-être encore mieux la corde.

1034. Dans les travaux de maçonnerie, de charpente, etc., les moufles ont le désavantage de se charger aisément de la poussière rongeante des matériaux, et d'être un peu moins faciles à graisser que les pivots et les dentures des rouages adjoints aux *grues;* au reste, nous en laissons le choix à l'expérience des *vrais architectes*, qui doivent être à la fois *constructeurs* et *mécaniciens*.

1035. Ces exemples de quelques usages des poulies suffiront pour concevoir tout autre emploi du même moyen, simple ou compliqué, qui peut être varié de beaucoup de manières. On y observera toujours que, quand chaque poulie fonctionne comme levier de première espèce (1026), la résistance qui la concerne y est égale en principe à la puissance motrice et lui fait équilibre ; mais que si la poulie fonctionne comme levier de deuxième espèce (1027), la puissance équilibrante n'est alors nécessairement que

la moitié de la résistance, sauf dans les deux cas le frottement des axes et la roideur des cordes. Dans le levier droit et simple, lorsque les forces lui sont obliques, on a vu (920 et suiv.) qu'elles sont estimées suivant un bras virtuel très-différent du bras apparent. Mais, avec la poulie, le bras virtuel de levier est toujours le même que le bras apparent, vu que la vraie direction et le point de tirage sur la poulie est toujours en tangente perpendiculaire à son levier, comme il a été dit pour les portions de cercle ajoutées à un bras de levier (918 et suiv.). Ainsi, avec les notions précédentes du *mouvement*, du *levier*, de la *composition* et de la *résolution des forces*, et du *plan incliné*, on a tous les éléments principaux des compositions mécaniques, en petit comme en grand.

1036. En citant précédemment la *vis de Hunter*, nous aurions dû mentionner aussi une autre puissance *funiculaire* illimitée et dans le même esprit; cette mention nous a été suggérée par un amateur des plus distingués, qui ne dédaigne pas de lire notre ouvrage honoré de sa souscription, quoiqu'il en possède amplement tout le sujet. Il s'agit du cylindre horizontal du *treuil*, mais formé de deux diamètres très-peu différents : si une extrémité de la corde s'enroule sur le plus fort diamètre, tandis que l'autre extrémité se déroule de dessus le moindre diamètre (le milieu de la corde passant au bas dans une poulie du poids), l'avantage de la puissance sera augmenté en proportion inverse du peu de différence diamétrale, et pourra devenir immense, c'est-à-dire autant que le permettra la solidité de la corde. La lenteur de l'effet augmentera, il est vrai, comme l'avantage de la puissance, suivant l'axiome universel en mécanique : « Ce qu'on acquiert en force est perdu en temps, » mais on a plus aisément du temps que de la force.

1037. Nous terminerons ces articles par un petit nombre d'autres exemples élémentaires d'application, tel que ceux d'une direction primitive du mouvement, *convertie* en une autre direction différente; c'est ce qu'on appelle *conversion du mouvement*. Il en est fait mention dans plusieurs ouvrages, et notamment dans le *Traité des Machines*, de M. Hachette, où l'on en trouve un tableau général divisé en près de 80 cases, contenant autant d'esquisses de diverses machines élémentaires, soit hydrauliques, soit *purement mécaniques*, telles que les conversions de mouvements rectilignes ou circulaires, continus ou *alternatifs* (c'est-à-dire de *va-et vient*), en mouvements différents, au moyen de toutes les combinaisons dont le sujet est susceptible; et le besoin en fait imaginer journellement. L'auteur comprend dans ses exemples, du reste trop dénués de détails, l'idée principale de quelques échappements d'Horlogerie, et, dans le courant de l'ouvrage, il décrit plusieurs machines hydrauliques et autres, avec de nombreuses planches; c'est un bon livre, et les ateliers n'auraient à y désirer que des explications moins mathématiques et plus développées. Mais une observation que tout mécanicien ne doit pas perdre de vue, c'est que, pour s'instruire dans les ouvrages qui traitent de la mécanique, il faut préalablement être assez avancé dans la géométrie et dans l'algèbre, moyens employés plus généralement que jamais pour l'exposition et l'analyse des questions. Il y a nombre de cas où la démonstration des propositions ne peut plus être traduite par le langage usuel du

raisonnement, sans des longueurs et des répétitions qui se confondraient dans l'esprit du lecteur.

1038. Ainsi, quoique nous ayons tenté dans nos articles ci-dessus de mettre les questions à la portée la plus ordinaire, sauf quelques développements un peu plus géométriques, mais qui sont très-accessibles avec une certaine attention, nous ne devons pas dissimuler que, pour suivre plus loin cette matière dans les auteurs spéciaux, il faut y porter des connaissances mathématiques; privé de leur secours, le lecteur ne peut guère dépasser ce que la nature de cet ouvrage nous permet d'en exposer. On concevra aisément que les difficultés d'une étude abstraite et souvent profonde ne doivent pas se compliquer avec l'ignorance de la langue qu'elle emploie, et avec l'absence des autres moyens préparatoires que tous les auteurs supposent acquis et familiers. Il faudrait mille volumes pour n'employer en mathématiques que le langage usuel de la conversation. L'analyse mathématique doit donc être nécessairement employée, comme beaucoup plus prompte et plus claire, et même le plus souvent indispensable (1). Nous allons maintenant expliquer les autres figures de la planche XXIV.

1039. La figure 1, à gauche du haut de cette planche, représente une conversion de mouvement des plus simples, celle du mouvement alternatif et vertical d'un levier droit, horizontal et inflexible AB, que l'on fait osciller autour du centre C, de sorte que les deux crochets annexés à ce levier remontent consécutivement une crémaillère verticale DD, à dents inclinées sur ses deux côtés. Il est facile de voir que, lorsque le bras du levier B, abaissé d'abord et ensuite relevé, vient de remonter par son crochet *e* la crémaillère DD, l'autre crochet *d*, qui a descendu lorsque B se relevait, fait monter à son tour, immédiatement après, la même crémaillère pendant la nouvelle descente de B; il n'y a d'intervalle que les repos instantanés des encliquetages. La répétition des mouvements *circulaires* et *alternatifs* des deux bras du levier AB se *convertit* donc ici dans le même plan en un mouvement ascensionnel de *progression rectiligne* et *continue* de la crémaillère DD. La vue seule de cette figure simple aurait pu nous dispenser d'entrer dans ces détails.

1040. La figure 2, au bas de la même planche, indique un moyen de convertir le mouvement *circulaire* et *continu* dans un plan vertical, de la roue *ef*, mue par la manivelle *g*, en un *mouvement alternatif* (ou de va-et-vient) de la crémaillère horizontale AB, au moyen de l'engrenage du râteau C, mobile sur son centre *d* et oscillant de droite à gauche et de gauche à droite, alternativement, par l'effet d'un tenon rond porté par la

(1) L'auteur de ce *Traité d'Horlogerie* ne se donne pas pour savant; il n'a aucune prétention à cet égard. Ses observations tendent uniquement à étayer la bonne pratique d'une théorie saine, lorsqu'il la trouve démontrée par la science, et à stimuler, chez ceux qui pratiquent les arts, cette instruction moyenne qui fait apprécier les secours de l'étude mathématique. C'est à celui-ci qu'appartient de résoudre les questions trop obscures pour le *sentiment*, faculté que l'on sait être si sujette à s'égarer. L'auteur se borne à développer, éclaircir et simplifier, suivant le titre de l'ouvrage, les opinions des savants et des plus habiles artistes anciens et modernes, et il y joint aussi ses propres observations, le tout comme études de théorie et d'expérience, en les mettant, autant qu'il lui est possible, à la portée de ceux qui savent concevoir le besoin de s'appuyer sur des principes et sur la pratique la mieux raisonnée.

roue en *e*, et qui parcourt, en y glissant, l'ouverture oblongue *de* du bras supérieur du râteau, pendant la rotation de la roue *fe*. C'est donc un mouvement *circulaire* et *continu*, converti au mouvement *rectiligne alternatif*, comme il est écrit auprès de cette figure.

1041. La figure 3, à l'angle du bas de la planche à droite, donne un moyen de convertir le mouvement angulaire alternatif de deux leviers horizontaux C et D, en un mouvement *rectiligne* et *vertical alternatif* de la tige du piston d'un corps de pompe, supposée perpendiculaire suivant la ligne AB. Les extrémités des deux leviers sont boulonnées librement en A*b* et en *ac* à la traverse E, dont le centre est boulonné librement aussi, entre les extrémités des deux bras d'une fourchette supposée terminer en AB le haut de la tige de piston, mais non représentée, pour dégager la figure. Les deux points extrêmes d'attache en A*b* et en *ac* de la traverse E s'élèvent et s'abaissent en même temps, et rendent cette traverse verticale et oblique alternativement. Il est facile d'en conclure que le centre E reste *sensiblement* dans la verticale AB, où il monte et descend en maintenant droite la tige ascendante et descendante du piston. On y parvient aussi par un *parallélogramme* plus compliqué pour les pistons de machines à vapeur. Les deux moyens sont de *J. Watt*, et peuvent être également appliqués au besoin dans d'autres compositions mécaniques.

1042. La figure 4 représente une autre idée ingénieuse du mouvement *circulaire continu* converti en mouvement *alternatif rectiligne*. Elle tire son origine du mouvement d'un point du *cercle générateur* que l'on verra décrire à la fois la courbe épicycloïdale de la denture d'une roue, et le flanc droit au centre des ailes d'un pignon, dans la théorie géométrique de l'engrenage. Nous avons déjà dit quelques mots de cette conversion de mouvement à la page 105 de la première partie de ce Traité, à l'occasion de quelques remarques générales et anticipées sur l'engrenage, dont nous renvoyons le surplus à notre prochain article sur cette matière si importante en Horlogerie, comme dans la plupart des machines.

1043. Dans cette figure 4, le *cercle générateur* dont nous venons de parler, et qui sera expliqué plus loin, à son article spécial, est transformé lui-même en un pignon, roulant par un engrenage effectif, dans la denture intérieure d'une roue fixe, au moyen d'un bras de manivelle aperçu entre cette roue et le châssis qui la maintient; voyez le profil séparé, à droite de la figure principale. Le diamètre *primitif* du pignon étant moitié juste de celui *primitif* de la roue, il résulte du principe géométrique que ce pignon doit faire deux révolutions sur son centre, et appliquer deux fois successivement tous les points de sa circonférence primitive sur une seule circonférence primitive de la roue, et qu'un tenon étant réservé en A sur le point de contact des deux circonférences, ce tenon doit, pendant la première révolution du pignon, parcourir en ligne droite vers le bas un diamètre entier, et vertical ici de la roue; ensuite que, par la seconde révolution du pignon pour achever l'autre moitié du tour de la roue, le même tenon doit décrire en ligne droite le même diamètre, en remontant jusqu'au premier point A de départ

Ainsi, le *mouvement circulaire* continu du pignon dans l'intérieur de la roue, converti en mouvement *alternatif rectiligne* du tenon, peut communiquer ce dernier mouvement à la pièce quelconque d'une machine. L'autre bras de manivelle du dehors, mobile ici à la main, peut être supprimé, si son axe est assujetti à quelque tige centrale tournant d'ailleurs sur elle-même; mais le deuxième bras intérieur de manivelle doit être essentiellement conservé.

1044. La figure 5 suppose l'engrenage de deux cônes dentés, mais dont l'un est placé à rebours de celui quelconque d'un engrenage ordinaire d'*angle;* l'un des deux cônes ne conserve ici que des dents isolées sur une courbe qui y serpente en hélice. Cette disposition singulière, uniquement esquissée dans *Hachette*, n'y est accompagnée d'aucune explication. Elle semble indiquer une sorte de modérateur destiné à rendre uniforme une première force progressive. Nous examinerons si l'engrenage y est possible avec régularité, lorsque nous traiterons cette matière. Ici, nous livrons cette idée à la méditation des mécaniciens; le plan au-dessous (fig. 6) achève d'expliquer la situation respective des deux mobiles coniques.

1045. La figure 14 est relative à la déviation de deux axes tournant du même sens, et engagés au moyen du genou appelé *suspension de Cardan*, qui peut remplacer jusqu'à un certain point quelques engrenages d'*angle* (au lieu du mot *divisés*, au-dessus de la figure, lisez : *déviés*). Cette construction ne permet guère qu'un angle obtus plus grand que 130 degrés, et, pour arriver à l'angle droit des deux axes, il faudrait un ou deux genoux intermédiaires. La force transmise y éprouve des variations de la longueur virtuelle des leviers plus ou moins obliques. Ce moyen abréviatif n'est guère applicable au fond qu'aux axes qui dévient très-peu, et pour prévenir la gêne dans les collets d'une longue conduite. La suspension de *Cardan* est employée à suspendre la boussole de mer, la boîte de mouvement d'une Horloge marine, quelques lampes, etc., qui exigent une suspension libre en tous sens (1).

(1) Dans cette construction de *Cardan*, toute inclinaison, à moins qu'elle ne soit exactement suivant l'un des deux axes croisés à angle droit, se compose plus ou moins des deux rotations de ces axes; et dès que le plan de mobilité de l'objet suspendu n'est pas au milieu ou à 45° des deux axes principaux ou de suspension, l'un d'eux s'incline plus que l'autre. On pourrait, à part la différence du genre, comparer cet effet composé à celui de tout mouvement circulaire ou suivant une courbe quelconque que nous avons dit (art. 826) se composer aussi de deux principales forces, qui, si elles ont une intensité virtuelle proportionnée, produisent le mouvement régulièrement circulaire, tandis que leur disproportion peut produire toute autre courbe quelconque différente du cercle. Nous ajouterons ici, par occasion et comme supplément à cet article trop court sur le *mouvement* (826), que la translation circulaire et rentrante sur elle-même est composée de la force centrifuge par laquelle le corps tend à s'échapper par la tangente, en suivant une ligne droite, et en même temps de la force centripète (celle physique de gravité vers le centre ou d'attraction centrale), ou bien par celle mécanique des pivots d'un axe de rotation, qui retiennent le corps. Dans le premier cas, les deux forces centrifuge et centripète doivent tellement se combiner, que le corps parcoure un cercle, mouvement le plus simple et le plus uniforme; dans le second cas, l'axe qui, au lieu de force centrale, retient invinciblement le corps dans un cercle, éprouve un effort et fait une résistance exactement égale à la force centrifuge. Mais s'il arrive dans le premier cas que l'une des forces ou toutes deux changent périodiquement d'intensité pendant une révolution du corps, elles peuvent lui faire parcourir une ellipse quel-

Du frottement dans les grandes machines, et de ses modifications dans l'Horlogerie.

1046. La résistance qu'un corps mobile éprouve dans son glissement sur un corps fixe, lorsque leurs surfaces sont en contact, est attribuée à ce qu'on appelle *frottement* en mécanique; cet effet est censé produit par le poids du corps en mouvement ou par l'action sur ce même corps d'une force quelconque ajoutée à son propre poids, et faisant presser entre elles les deux surfaces en contact. La quantité du frottement n'est pas uniquement une question de principes, comme les précédentes; elle n'est résolue la plupart du temps que par des expériences spéciales, guides les plus ordinaires et les plus sûrs en cette matière, comme en bien d'autres cas.

1047. L'explication ancienne de la cause qui constitue le frottement, telle que l'engrènement des fibres saillantes plus ou moins flexibles, ou d'aspérités dures et roides des surfaces en contact, n'est, suivant quelques modernes, qu'une supposition répétée par l'habitude plus que par l'examen : c'est celle que *Berthoud* indique d'après les physiciens de ce temps; mais d'autres pensent que l'engrènement supposé ne peut avoir lieu, vu le peu de régularité de distance entre les points indéfiniment multipliés des mêmes matières, et qu'il doit y avoir encore moins de régularité avec des matières différentes, régularité sans laquelle l'engrènement leur paraît impossible; les surfaces ne se touchant que par les sommités, à distances inégales, des molécules déjà aplaties un peu au même niveau par le poli ou l'adouci plan et droit des parties extérieures, l'engrènement ne semble pas pouvoir y trouver lieu. D'un autre côté, la simple adhérence physique, à laquelle d'autres avaient voulu recourir, aurait été suivant le

conque, sorte d'ovale ou courbe *finie* et rentrante, reconnue dans tous les mouvements des corps célestes; car aucun de ceux que l'on a observés ne parcourt absolument un cercle D'autres proportions entre deux forces peuvent faire parcourir aux corps d'autres courbes diverses, dites *infinies*, comme la spirale et d'autres qui ne rentrent pas.

Nota. En mécanique, un corps qui tourne en équilibre sur son axe ou sur ses pivots, par l'action d'un engrenage ou par tout autre moyen, peut acquérir une extrême vitesse, si la masse d'un côté de l'axe est parfaitement en équilibre avec celle qui se trouve diamétralement opposée de l'autre côté, si le corps a peu de poids, si ses pivots et son engrenage ont peu de frottement, si la résistance du milieu ambiant est éludée ou supprimée. Mais la moindre inégalité d'équilibre, augmentant la force centrifuge plus d'un côté que de l'autre, et par suite le tirage sur l'axe dans un seul sens, peut, en raison d'une extrême vitesse, briser les pivots, ainsi que *F. Berthoud* parait vouloir l'indiquer dans son *Essai*, lorsqu'il aborde en passant cette question sans la développer, comme ayant trop peu de rapport direct avec l'Horlogerie.

Des expériences de ce genre ont été faites à diverses époques, et nous en avons eu aussi l'occasion: nous avons obtenu, en effet, une vitesse qui aurait paru peu croyable, si le passage infaillible des dentures et leur calcul ne l'avaient pas attestée. Nous y avions employé une vis sans fin, à double filet, dont le frottement, toujours considérable, ralentit beaucoup le mouvement, et le but de cette machine particulière l'exigeait ainsi. Nous aurions pu y employer l'engrenage connu de *With*; mais dans les mouvements rapides, avec peu de pression, cet engrenage contracte à la longue trop d'adhérence inégale.

Ce qui serait plus intéressant pour l'Horlogerie, ce serait de constater dans de telles expériences la régularité constante possible, ou le défaut obligé d'uniformité du mouvement continu de rotation, ce qui paraît être encore un problème à résoudre en mécanique; des essais assez récents seront cités plus loin.

rapport de l'étendue des surfaces, et l'expérience prouve tout le contraire. Une sorte de cohésion proportionnelle à la pression entre les points déjà aplatis des surfaces paraîtrait peut-être plus vraisemblable; mais, faute de preuves, on peut considérer la cause du frottement comme encore inconnue. Des explications hasardées importent bien moins à la science que l'expérience des faits suffisamment constatés. L'ancienne physique se hâtait trop d'accorder une pleine confiance aux théories conjecturales. L'étude moderne ne les admet que comme de simples suppositions momentanées, propres tout au plus à servir d'appui à la mémoire, pour l'enchaînement supposé des phénomènes dans l'état actuel de la science; or celle-ci ne s'en réfère plus qu'à l'expérience, à la mesure, à la comparaison des faits bien observés et qui ne varient pas essentiellement, tandis que de nouvelles découvertes changent continuellement les théories provisoires. Nous avons déjà fait remarquer ailleurs que c'est à cette méthode prudente que la science actuelle doit la plupart de ses progrès.

1048. *Amontons*, physicien français, et membre de l'ancienne Académie des sciences, inventeur, en 1695, d'une nouvelle clepsydre, fit sur le frottement des expériences recueillies dans les Mémoires de cette Académie en 1699; elles sont assez généralement préférées à celles de *Muschembroeck*, physicien hollandais presque du même temps. Les expériences de *Désaguilliers*, autre physicien français postérieur, s'accordent assez avec celles d'*Amontons*. Feu *Coulomb*, capitaine du génie, a publié en 1821 diverses expériences pour la théorie des machines simples, où il a traité du frottement dans les fortes machines, de la roideur des cordages, de la force humaine appliquée. etc.; il aborde aussi dans le même ouvrage les questions délicates du frottement à la pointe des pivots de suspension de l'aiguille de la boussole, comme aussi de la force de torsion et de l'élasticité des fils de métal, etc. Nous extrairons quelques règles générales des expériences de cet observateur habile, particulièrement cité dans les recherches de précision.

1049. Enfin, M. *Morin*, capitaine d'artillerie et professeur au Conservatoire des Arts, a renouvelé tout récemment, à Metz, des expériences sur le frottement dans les grandes machines, qui s'accordent en partie avec celles de *Coulomb*, sans en confirmer toujours les détails. Les moyens perfectionnés par le capitaine *Morin*, exécutés plus en grand, défrayés par le gouvernement, et ses mémoires hautement approuvés par l'Académie actuelle des sciences, nous feront préférer les observations plus récentes du dernier auteur; il est fort désirable que cet habile professeur soit constamment autorisé, comme on l'espère, à continuer des recherches d'une utilité aussi générale, et à descendre aussi jusqu'aux détails des légères pressions dans les plus petites machines.

Nous ne donnerons ici qu'un résumé très-succinct des résultats trouvés par les auteurs anciens et modernes que nous venons de citer. Ils suffiront à ces premières notions générales de mécanique, les détails ne pouvant se trouver que dans les ouvrages originaux.

1050. On s'accorde communément à reconnaître que le frottement dans les grandes machines est indépendant de l'étendue des surfaces, et proportionnel à la pression;

en sorte qu'une masse de matière moins épaisse que large et longue exige, pour glisser sur sa tranche, ou son épaisseur, ou *de champ*, ce qui revient au même, un effort égal à celui qui la fait glisser sur sa largeur ou à plat ; ce qui laisse supposer que, la moindre surface du corps d'un même poids étant plus pressée que la plus grande surface, et en raison inverse et proportionnelle du nombre de centimètres carrés en contact, il doit y avoir équilibre entre les résistances dans les deux cas.

1051. Suivant presque tous ces auteurs, l'intensité du frottement est indépendante de la vitesse dans les grandes machines ; et nous aurons plus loin l'occasion de remarquer aussi la conformité de cette dernière loi dans des pressions très-légères. Le physicien *Amontons* trouve à peu près la même résistance de frottement entre diverses substances telles que le bois, le fer, le cuivre, quand leurs surfaces suffisamment étendues pour ne pas s'affaisser visiblement sous la pression sont enduites de corps gras. Suivant lui, la résistance moyenne dans les machines est ordinairement le tiers de la pression ou à très-peu près. Du reste cet auteur et *Désaguilliers*, qui en diffère peu, n'ont guère opéré que sur des machines de dimension propre à faire partie d'un cabinet de physique.

1052. *Coulomb* a fait ses expériences sous des pressions variées de 50 à 1600 livres : d'abord, suivant lui, l'effort instantané pour faire glisser l'une sur l'autre deux surfaces droites et restées quelque temps en contact et en repos est généralement plus grand que l'effort continu nécessaire à entretenir le glissement; et c'est ce que confirme aussi l'expérience commune. La différence est plus ou moins forte, suivant divers cas ; tandis qu'un léger ébranlement communiqué à l'appareil par *percussion* paraît produire dans les corps une sorte de vibration suffisante pour déterminer le départ du corps en repos, qui se trouve tiré d'ailleurs par la force convenable à la continuité de son glissement. Voyez l'art. (1005) sur l'effet du coup de marteau.

La force nécessaire pour sortir les corps de leur état de repos prend des valeurs différentes suivant la nature des substances. Lorsque les surfaces sont graissées, le premier départ est beaucoup plus aisé, et l'effet du plus ou du moins de repos devient peu sensible ; mais, sans graisse, la résistance augmente avec le repos et selon les matières.

1053. Suivant *Coulomb* et le capitaine *Morin*, le frottement *à sec* du bois sur bois, et du fer sur bois, a sa résistance entre 1/3 et 3/5 de la pression ; mais dès les premiers temps des expériences *à sec*, les surfaces, s'altérant promptement, font varier et augmenter la résistance (les grands frottements à sec ont rarement lieu dans les machines) ; les surfaces à sec ne se polissent pas et s'usent en formant des grains durs qui les déchirent mutuellement.

Cet effet n'a pas lieu avec l'entremise de corps gras, tels que le suif, le saindoux et l'huile d'olive, qui, en diminuant beaucoup l'intensité du frottement, unissent de plus les surfaces. Il est donc inutile d'employer ces enduits.

1054. Le déchirement entre métaux *fibreux*, frottant à sec sur métaux *fibreux*, tels que le fer et l'acier, qui glissent parallèlement à leurs *fibres*, est plus sensible, suivant M. *Morin*, que quand ils frottent sur des métaux *grenus*, tels que la fonte, le bronze, le

cuivre jaune, etc. Il s'ensuit qu'il est préférable que l'un des métaux soit de la première espèce et l'autre de la seconde ; cette méthode est également pratiquée en Horlogerie : mais l'espèce d'axiome si généralement admis, que le frottement entre des corps d'espèces différentes est moindre qu'entre des corps de même espèce, ne peut être considéré comme absolument exact, car il y a aussi des corps de même espèce dont le frottement est moindre, au moins sous certaines pressions, et des corps d'espèces diverses qui s'usent rapidement ; on voit donc qu'il n'y a rien d'absolu sur ce sujet.

1055. Le frottement *à sec* des machines qui s'arrêtent s'oppose fortement au départ, et exige bien plus de force que pour les entretenir en mouvement. Entre deux surfaces de bois de chêne *à sec*, il faut quelquefois, pour vaincre l'inertie causée par le repos, une force directe et sans percussion, à peu près quadruple de celle propre à entretenir leur mouvement.

1056. Il n'existe pour chaque pression qu'une seule valeur du poids moteur qui puisse entretenir un mouvement uniforme, et il faut la tâtonner longtemps. Au delà de la mesure, la marche des corps s'accélère ; en deçà elle retarde. De quelques nombres de leviers ou de roues qu'une machine soit composée, si un poids en entraîne un autre, d'un mouvement uniforme, le poids tombant, considéré comme puissance, multiplié par l'espace qu'il parcourt, est, dans la théorie, égal au poids élevé multiplié par la hauteur dont il s'élève ; cette dernière quantité représente l'effet théorique ; mais celui-ci, altéré dans la pratique, par les frottements, les chocs et tous les inconvénients des machines, est toujours inférieur à la puissance multipliée par l'espace qu'elle a parcouru. (Principale cause de l'impossibilité du prétendu mouvement perpétuel.)

1057. Le balancement sur une courbe frottante facilite à vaincre l'inertie du départ.

1058. Le saindoux est généralement préférable au suif, à moins que celui-ci ne reste constamment fondu ou à demi liquide par la température du corps. L'huile ne convient qu'à de faibles pressions. L'auteur ne trouve pas d'avantage relatif à la quantité du frottement, dans le mélange de saindoux et de plombagine ; il n'a peut-être en effet que celui de n'avoir pas besoin d'un renouvellement si fréquent.

1059. Un filet d'eau arrête le rodage progressif entre métaux de différentes espèces ; mais, avec fonte sur fonte, l'eau est un mauvais enduit, et les surfaces s'usent rapidement ; le frottement y est double de celui de quelques autres corps sans enduit. Quand les surfaces de fer et de cuivre se rodent et que le fer se colore de cuivre, le frottement s'accroît jusqu'à 20/100es de la pression (*et même au delà*).

1060. Les lois observées sur le frottement des *tourillons* sont à peu près les mêmes que pour les surfaces planes. La valeur dans chaque cas dépend de la manière dont l'enduit se répand et se maintient sur les surfaces en contact : d'où résulte l'avantage et souvent la nécessité de divers appareils imaginés pour effectuer l'alimentation des surfaces par des corps gras. L'ensemble des diverses expériences paraît se résumer généralement à ce qui suit :

1061. Le frottement des surfaces tant planes que circulaires, de bois sur bois ou sur fer, de fer sur fonte ou sur cuivre, avec enduit continuel de suif, saindoux ou huile, ce

qui comprend presque tous les cas de la pratique, est, terme moyen, environ les 0,054 (à peu près les 5½/100es) de la pression.

1062. Celui des surfaces alimentées de loin en loin, environ les 0,070-à-0,080 (7 à 8/100es) de la pression.

1063. Celui des surfaces restées un peu onctueuses, ou mouillées d'eau, environ les 0,140-à-0,160 (14 à 16/100es) de la pression.

1064. Dans les expériences de M. *Morin*, les coussinets en bois de gaïac ou autre bois dur ne sont pas tout à fait aussi avantageux que le trouvait *Coulomb ;* le frottement s'accroît sensiblement en négligeant l'enduit. Cependant au cas que le renouvellement lu corps gras soit forcément négligé, comme dans les machines de guerre, les chèvres, treuils, pompes, ponts-levis, etc., ces bois durs conservent plus longtemps leur onctuosité et n'altèrent pas notablement les surfaces.

1065. Dans les fortes pressions le cambouis, encore ductile, laisse aux surfaces métalliques une onctuosité plus régulière et constante que les corps gras plus fluides.

1066. M. *Morin* mentionne des expériences sur des poulies graissées au suif, mais sans renouveler l'enduit pendant trois mois de service, en manœuvrant des poids de plus de cinq milliers, dont le frottement dans ses autres expériences immédiates et sans nouvel enduit était entre environ 0,120 et 0,140 (12 à 14/100es) de la pression.

1067. M. *Morin* trouve encore que, dans les grandes machines et pour un même état des surfaces, le diamètre des tourillons n'a pas d'influence directe sur le rapport du frottement à la pression. « Comme l'étendue des surfaces, dit-il, diminue avec le diamètre, d'où il résulte une augmentation de pression par centimètre carré, et que cet effet occasionne une expulsion plus ou moins complète de l'enduit en rapprochant les surfaces de l'état onctueux, ce qui tend à augmenter dans ce cas le rapport du frottement à la pression, ces deux causes produisent une élévation de rapport compensant les petits diamètres. Il ajoute que, de toutes ces données, il ne déduit pas de règle pour les faibles pressions comme celle de l'Horlogerie, qui exigeraient des expériences spéciales. » *Reste toujours le rapport du rayon ou levier du tourillon à celui de sa roue.*

Du frottement des poulies, de la résistance des cordes et de la force humaine avec la manivelle.

1068. Pendant que nous traitons ici des grandes machines, auxquelles de grosses Horloges publiques peuvent être assimilées en plusieurs points, nous rapporterons quelques observations de *Coulomb* sur le frottement des poulies, sur la résistance des cordes, et sur l'emploi constant de la force humaine appliquée au mouvement des manivelles, le tout à l'usage principal des mécaniciens en grand. Elles concernent d'ailleurs les *machines funiculaires petites ou grandes* dont nous avons parlé, et où nous avons fait abstraction de la résistance des cordes; or cette résistance a souvent besoin d'être appréciée.

1069. Nous trouvons dans *Coulomb* que, avec une poulie d'un pied de diamètre, dont

le trou central ou l'œil est garni en cuivre (laiton), et roule sur un axe de fer de 19 lig. de diamètre, ayant 1 lig. 3/4 de jeu, et nouvellement graissé de suif pur, si le demi-cercle supérieur de cette poulie porte une bonne ficelle d'environ 3 lig. de grosseur, capable de soutenir de chaque côté un poids de 100 livres, il faut une force de traction de 2 liv. 1/2 pour faire tourner la poulie d'un mouvement lent et continu ; il suppose que, la corde n'étant pas tout à fait neuve, sa résistance, vu son peu de grosseur, le grand diamètre de la poulie, et sous un tel poids, peut être considérée comme à peu près nulle.

1070. Avec la même poulie, une corde de 4 lignes de diamètre, soutenant un poids de 200 livres de chaque côté, nécessite une force de traction de 6 livres 1/2 pour produire un mouvement lent et continu; cette même corde de 4 lignes et d'environ 12 lignes et 1/2 de circonférence, est appelée, dans les corderies, corde de 6 *fils de carret*. Celle de 15 fils de carret a 6 lignes de diamètre et 19 lignes de circonférence ; celle de 30 fils de carret a 9 lignes de diamètre et 29 de circonférence, et les autres à proportion.

1071. Dans les grosses machines les forces nécessaires pour ployer les cordes de diverses grosseurs autour d'un rouleau sont assez exactement entre elles, comme les nombres de fils de carret qui composent ces cordes. Un cordage neuf peut porter avec sécurité 80 livres par fil de carret. Ce qui revient, dit *Coulomb*, à 6 livres, 8 par millimètre carré.

1072. Quant aux divers diamètres des poulies ou rouleaux, *Coulomb* rapporte les expériences en petit d'*Amontons* et de *Désaguilliers* comme établissant que la force nécessaire pour plier une corde autour d'un cylindre est en raison inverse du rayon des cylindres, et directe de la tension et du diamètre de la corde ; et il ajoute que cette règle est à peu près applicable dans la pratique sous les grandes tensions, avec néanmoins cette différence relative au diamètre de très-gros cordages, où *Coulomb* trouve la résistance plus forte et proportionnelle au carré de leurs diamètres ; mais cela varie néanmoins suivant la manière de fabriquer les cordes, l'usé, et le plus ou moins de flexibilité.

1073. Le frottement des poulies sur leur axe paraît un peu moindre que celui des surfaces planes, vu que celles-ci écartent les corps gras sans les ramener, tandis que les axes les ramènent en partie aux mêmes points de frottement. Dans les hautes pressions, les corps gras quittant plus facilement les surfaces, le frottement y augmente d'une manière sensible.

1074. Dans toutes ces expériences sur les poulies, comme avec les surfaces planes, la vitesse ne paraît pas influer sensiblement sur la quantité de frottement.

1075. Lorsque la puissance humaine est appliquée à entretenir le mouvement des machines à force de bras et au moyen des manivelles, *Coulomb* établit cette force à 25 livres par révolution ; mais avec un travail continu il ne compte guère que sur 15 à 20 livres ; et en supposant le rayon de la manivelle d'environ 1 pied, il compte 30 tours par minute pour un court intervalle. Pour un travail journalier, il n'admet que 20 à 22 tours par minute, et 6 heures de travail effectif, ce qui, dit-il, à 20 tours par minute, donne pour quantité d'action journalière environ 236 livres élevées à 3079 pieds en six heures

de temps. La pratique paraît avoir décidé que les manivelles, surtout quand il y en a plusieurs dont les rayons se croisent, sont préférables à la *sonnette* qui élève le *mouton*. Avant l'usage de la vapeur, presque toutes les grandes machines d'épuisement qui n'étaient pas mues par des chevaux et un manége l'étaient à bras par des manivelles. Les pistons des machines à vapeur font eux-mêmes mouvoir des manivelles, dont les moments critiques ou désavantageux sont aidés ou suppléés par la force acquise et puissante d'un fort *volant en mouvement* (1).

Du frottement sous les légères pressions de l'Horlogerie.

1076. Quelque disproportionnée que paraisse ici cette transition, des questions de forte mécanique dont nous avons exposé ci-dessus quelques premières notions, à celles si délicates de la plupart des machines destinées à la mesure du temps, on ne doit pas oublier que les unes et les autres sont également utiles à l'Horloger qui veut se livrer à des conceptions neuves ou en apprécier d'autres, puisque les principes sont généralement les mêmes, à quelques variétés près provenant de la nature des matières, de leur dureté, de leur préparation, du genre de travail, des forces infiniment plus modérées et du but proposé. Il suffira de rappeler, comme nous l'avons fait plus d'une fois, que l'Horloger doit être essentiellement mécanicien, comme instruction, tandis que le mécanicien qui construit de grandes machines est très-bien dispensé d'être Horloger. Plusieurs Horlogers ont joint ces deux titres ensemble, comme pour avertir le public de la différence entre celui qui opère avec connaissance et principes, et le simple ouvrier qui, n'ayant que copié du neuf qu'il n'entend pas, se hasarde à entreprendre le rhabillage, où la connaissance complète des principes est nécessaire pour corriger sûrement les défauts. Dans ce cas, les moindres difficultés embarrassent l'ignorance, qui ajoute le plus souvent à des ouvrages usés ou défectueux des défauts qu'ils n'avaient pas, en laissant ceux qui existent; mais nous laissons ces vérités connues de tous les gens instruits, pour nous occuper des moyens de prévenir, autant qu'il nous est possible, un inconvénient beaucoup trop commun.

1077. Nous remarquerons d'abord pour le sujet actuel, et nous avons dit (1067) que l'habile professeur M. le capitaine *Morin* avertit lui-même, dans l'un de ses mémoires, qu'il n'a pas prétendu comprendre sous les mêmes lois les frottements dans l'Horlogerie, dont en effet la pratique n'adopte pas, pour les pivots de ses derniers mobiles sous de légères pressions, les rapports de frottement des tourillons cités ci-dessus, art. 1067. Cette anomalie semble due à la viscosité plus puissante relativement, sous de très-légères pressions, de l'huile toujours abondante et dont l'effet doit changer avec les diamètres, surtout dans les montres. Les premiers mobiles dans l'Horlogerie soumis à de plus fortes pressions semblent en effet rentrer davantage sous les lois générales du frottement des grandes machines, et les deux pivots inégaux en grosseur de la *fusée* des Montres

(1) Pour de plus amples détails sur le frottement, voyez la *Théorie des machines simples*, par Coulomb, 1 vol. in-4°. Paris, 1821; et surtout les *Expériences du capitaine Morin faites à Metz*, mémoires de 1832 à 1838 et suivants. 2 vol. in-4°. Paris et Metz.

sont principalement dans ce cas. Les montres à fusée de diverses construction, ont leur gros pivot de remontoir tantôt du côté du plus fort tirage du ressort et de la chaîne, et tantôt du côté opposé, sans que l'on remarque de différence sensible dans l'usure de leurs trous d'un diamètre double l'un de l'autre, ce qui semble établir que le frottement y est égal. Mais il n'en est pas de même pour les derniers mobiles, où la viscosité naturelle de l'huile même fraîche, et plus encore de celle qui s'épaissit, produit une résistance variable suivant les diamètres, et qui paraît être en proportion directe de leur grosseur. Il faut encore observer que le jeu de ces petits pivots dans leurs trous est, toute proportion gardée, bien plus grand aux derniers mobiles des Montres et Pendules, que dans les grandes machines, ce qui permet, au point de contact entre la surface du pivot et la paroi de son trou, de se déplacer en se portant sur la résultante de la puissance et de la résistance, et de modifier ainsi le rapport des bras de levier; V. les remarques de *Coulomb* dans sa *Théorie* des machines de rotation, articles 155 et suiv., et figures 23 et 24. Mais on manque en Horlogerie d'expériences spéciales sur ce sujet, comme sur bien d'autres; les artistes capables n'ont pas eu le temps de les faire, et de moins habiles n'auraient pas su les entreprendre. *Berthoud* lui-même en fait l'aveu. *L'art est long*, et les dédommagements peu proportionnés à la peine. Quelques autres artistes riches ou plus libres, et qui avaient du talent, n'étaient pas assez instruits pour se livrer à de pareilles recherches.

1078. Nous bornerons donc les articles qui suivent au recueil de quelques lois admises dans l'Horlogerie d'après l'expérience commune, et nous rapporterons particulièrement ce qu'en dit *F. Berthoud;* car, si cet habile artiste s'est contredit trop souvent dans le cours de ses nombreux écrits (9 vol. in-4°) et s'il y a laissé quelques erreurs propres, avec celles de son temps, il a plus souvent encore raisonné avec justesse sur bien des points de son art que d'autres auteurs n'ont pas voulu ou pas osé aborder; et nous devons remarquer ici qu'en fait de frottement *F. Berthoud* est assez d'accord avec lui-même et presque toujours avec la pratique et l'expérience commune. Nous n'ajouterons que quelques mots pour modifier, d'après des expériences plus récentes, son opinion, qui, sous ce rapport, en a quelquefois besoin.

1079. « On diminue le frottement, dit *F. Berthoud,* 1° en faisant le plus petits possibles les pivots des roues qui se meuvent avec le plus de vitesse; 2° en donnant à ces roues le moins de pesanteur que permet la solidité nécessaire à l'effort qu'elles ont à vaincre; 3° en tenant les pivots durs et très-ronds, et leur surface polie ou très-unie; 4° en choisissant les matières les plus serrées pour y faire rouler les pivots; 5° en faisant rouler des pivots de l'acier le plus fin sur une matière d'un tissu différent, tel que le laiton bien durci, ou sur un mélange d'étain et de zinc, en composant une matière analogue à celle des timbres, etc. Il serait encore mieux de faire rouler les pivots dans le diamant, s'il était possible d'y faire parfaitement un trou très-fin. »

1080. Nota. L'expérience a prouvé depuis le peu d'avantage de ces alliages pour les trous des pivots; mais elle a confirmé la pensée de l'auteur sur les corps durs, en substituant au diamant, trop difficile à bien percer, les trous en rubis, qui, bien exécutés (ce qui

est encore assez rare), diminuent beaucoup le frottement sous des pressions légères. *Berthoud* a fini lui-même par employer les rubis. Du reste, nous avons déjà dit ailleurs, et nous répétons, que les rubis ne paraissent pas convenir, sous de fortes pressions, aux gros pivots, qui se rodent souvent dans les pierres dures, malgré l'emploi des corps gras ; en général, le bon laiton vaut mieux que des pierres imparfaites.

1081. « La considération des frottements, continue *F. Berthoud*, est fort essentielle dans les Montres, surtout pour les pivots du balancier, *à cause de la grande vitesse qu'exige ce régulateur*. La roue d'échappement d'une Montre ou d'une Horloge exige aussi que l'on ait égard à ses frottements et qu'on les réduise à la plus petite quantité... Nous ne ferons point d'article particulier sur cette matière... Je me contenterai, dit-il, du précis des expériences qui sont relatives à l'Horlogerie, lesquelles ont été faites par *Muschembroeck*, remettant à un autre temps à construire des machines pour faire ou répéter ces expériences. Voici donc ce que ce physicien a conclu : (On voit que le temps ou les moyens de dépenses ont manqué à *Berthoud* comme à bien d'autres, ainsi que nous venons de le dire plus haut, et qu'il admet l'erreur de son temps sur l'influence de la vitesse.) *On prononce Mouschémbroc.*

1082. « La force requise, dit *Muschembroeck*, pour faire tourner *à sec* un cylindre ou essieu d'acier bien rond et poli sur des coussinets de cuivre rouge (de rosette), est la sixième partie du poids du cylindre, appliquée à la circonférence de la partie frottante : il faut pour cela que la vitesse soit presque égale à zéro, ou très-petite ; mais lorsqu'on y met de l'huile, il ne faut plus que la huitième partie du poids. On trouve à peu près la même chose lorsque l'axe tourne sur des coussinets de cuivre jaune (laiton) ; mais si l'on charge l'essieu de différents poids, le frottement n'augmente pas autant qu'avec des coussinets de cuivre rouge.

1083. « Le frottement sur des coussinets de plomb est le même qu'avec le cuivre jaune. Avec des coussinets d'acier, et à sec, il faut le quart du poids ; avec de l'huile il ne faut qu'un sixième. Avec des coussinets d'étain et à sec, le frottement est pareil à celui des coussinets d'acier à sec, c'est-à-dire le quart du poids du cylindre.

1084. « Le frottement devient plus grand quand le poids augmente sur l'essieu, et alors le frottement augmente dans un plus grand rapport que le poids.

1085. « Lorsque les corps ne se meuvent pas avec beaucoup de rapidité les uns sur les autres, le frottement est d'ordinaire en raison de la vitesse. Ce rapport n'est pas toujours exact ; car lorsque le mouvement est fort rapide, le frottement augmente. »

Nota. Ceci est contredit par les expériences de M. *Morin*, et même par d'autres récentes en Horlogerie, qui établissent que le frottement est généralement indépendant de la vitesse (1).

(1) Suivant quelques expériences d'Horlogerie assez modernes, la vitesse, toujours accompagnée de corps gras ou d'huile, n'augmente point le frottement. Nous avons vu des mouvements de balancier à 36,000 vibrations par heure, doubles de celui ordinaire à 18,000, ne pas produire plus d'usure, et ne pas indiquer plus de frottement. Nous avons nous-même fait exécuter un échappement garni en rubis avec huile, lequel donne 216,000 vibrations par heure, et ne nous a laissé apercevoir aucune trace d'usure ni indice d'augmentation de frottement pendant un usage assez prolongé.

1086. F. B. ajoute : « Nous devons observer ici qu'il ne paraît pas que les expériences de *Muschenbroeck* prouvent rien de certain sur les frottements qui résultent de l'augmentation de surface, le poids restant le même. *Amontons* a prétendu le premier que l'augmentation de surface n'augmente pas le frottement, ce qui me paraît très-vraisemblable, quoique ce principe soit contredit par d'autres physiciens. Le docteur *Désaguilliers*, tome 1, page 270 de sa *Physique expérimentale*, appuie par des expériences le sentiment d'*Amontons*. L'étendue des surfaces doit s'entendre aussi des coussinets plus minces ou plus épais sur lesquels on ferait tourner un cylindre ; le frottement serait alors égal, ou *à peu de chose près*. Mais quand même il arriverait que le frottement par la petite surface fût moindre pour le moment actuel, il ne s'ensuit pas de là que cette manière soit préférable ; car lorsqu'un corps pesant qui roule sur un autre ne pose que sur une petite surface, alors les parties de matière se pénètrent plus avant, et se déchirent ; ainsi le frottement augmente et varie. Mais si l'on fait alternativement tourner le même corps sur des pivots qui soient de différents diamètres, alors les frottements augmentent comme les diamètres. »

1087. Nota. On voit que F. B. adopte l'idée de l'engrènement des aspérités, Mais, quoi qu'il en soit de cet engrènement, les parties frottantes trop étroites s'affaissent sous une pression trop grande relativement à leur étendue, les parties grasses en sont chassées, et les parties plus pressées, se touchant à nu, contractent une adhérence quelconque, et se déchirent.

1088. D'après ces idées de F. B., un peu modifiées depuis dans l'Horlogerie, on voit que les artistes sont persuadés, par l'expérience, que la loi du frottement des petits pivots sous de légères pressions ne suit pas la loi rapportée plus haut des tourillons dans les grandes machines, et que leur frottement est considéré ici comme proportionnel aux diamètres, même avec des pivots moyens et des pressions moyennes.

1089. Le cas de réduction de la surface frottante pour diminuer le frottement ne peut toutefois avoir lieu qu'entre des corps très-durs, comme le rubis avec l'acier trempé peu *revenu*, sous de légères pressions incapables d'user les matières, et avec entretien constant d'huile : tel est l'avantage des bons trous en rubis, *bercés* à propos, pour ne toucher au pivot que par une partie peu étendue du milieu de la profondeur du trou. On peut tenir les pivots plus gros ou plus chargés qu'avec des trous en laiton (1). ***Mais le diamètre réduit des pivots absorbe toujours moins de force. En général, la dureté des matières ne suit pas la pesanteur de leurs dimensions.***

(1) Nous ajoutons ici un extrait des expériences de *Coulomb* sur le frottement des pointes de suspension contre la chape de l'aiguille dans la boussole, dont on peut tirer des inductions dans les constructions qui concernent la mesure du temps. Mais nous invitons les Horlogers à ne point s'occuper de l'aimantation de ces aiguilles. L'*aimant* peut être considéré comme un poison dans l'Horlogerie, ainsi qu'on le dit de la fine poudre de diamant logée dans d'imperceptibles soufflures des rubis, ou dans leur sertissure mal close, et qui, détachée par l'huile, empoisonne les pivots et les portées, au point d'obliger de les remplacer par de nouveaux pivots avec chapeau, et en changeant les trous ; mais nous en parlerons en détail lors du travail des pierres et des outils appropriés. *Il faut donc éloigner l'aimant des ateliers d'Horlogerie.*

La vitesse, suivant *Coulomb*, n'est pour rien dans le frottement des pointes de boussole ; la résis-

tance y est constamment proportionnelle à la pression, c'est-à-dire au poids de l'aiguille. Mais les diverses matières de la chape donnent lieu aux différences du frottement. On n'y emploie jamais de corps gras, qui gêneraient la liberté de l'aiguille.

Si la chape est en *grenat*, dont le frottement pris pour unité serait supposé 1,000, celui de l'*agate* serait 1,214; celui du *cristal de roche* serait 1,313; celui du *verre*, 1,777; celui de l'acier, 2,257, plus que double de celui du grenat (compté ici en chiffres décimaux).

Si le poids de l'aiguille ne dépasse pas 100 grains, on peut donner à la pointe du pivot un angle de 18 à 20° (div. en 360). Cet angle peut être moindre à mesure que l'aiguille est plus légère, mais pas au-dessous de 10 à 12°; car la pointe d'acier, trempée dure et peu *revenue*, serait encore sujette à se rebrousser.

Pour un poids d'aiguille de 5 à 6 gros, l'angle le plus avantageux pour que la pointe se conserve paraît être celui de 30 à 45° (toujours du cercle de 360°).

Un plan poli n'exige pas une pointe aussi aiguë que la concavité du fond de la chape, concavité que *Coulomb* trouve rarement assez régulière. Mais un plan permettrait trop le glissement de l'aiguille, qui, se décentrant, perdrait son équilibre.

Le frottement du verre poli est (à part l'acier) un des plus grands parmi les matières ci-dessus comparées; cependant il est le plus régulier. L'auteur suppose que c'est en raison de la petitesse de ses pores. Au lieu d'un plan de verre poli, qui glisse trop aisément, *Coulomb* employait avec succès, contre le déplacement, des lentilles de verre un peu concaves. Il serait peut-être préférable d'employer une petite plaque peu concave de rubis, rapportée au sommet tronqué du cône de l'aiguille. Le moyen ordinaire qui sert à maintenir l'aiguille appuyée contre sa glace supérieure, pour les cas de transport, pourrait aisément être disposé pour recentrer aussi l'aiguille et la remettre en équilibre sur sa pointe.

La *torsion* élastique des fils de métal, laiton ou fer, expérimentée par *Coulomb*, est d'une application rare dans l'Horlogerie; mais elle confirme du moins, si elle ne l'a pas précédée, la méthode d'écrouissage par ce moyen, déjà citée (558 et 609 en note). D'autres recherches sur l'élasticité s'accordent aussi avec celles de *Pierre L. R.*, fils de *Julien*, suivant lesquelles la force élastique d'une lame d'acier augmente comme la quatrième puissance de son épaisseur, c'est-à-dire que, l'épaisseur étant doublée, la force est huit fois plus grande. *Coulomb* trouve, en effet, la force réactive de torsion des fils ronds en raison *inverse* de leur longueur, et *directe* de la quatrième puissance de leur diamètre.

Quant à l'élasticité des lames d'acier, dans la simple traction sur trois de ces lames de figure semblable et fixées d'un bout, *Coulomb* a trouvé qu'une d'elles, trempée *à blanc*, sans revenu, se rompait sous une traction de 6 liv., mais qu'après tout autre angle moindre de flexion elle revenait à la première position; qu'une deuxième lame, trempée et *revenue violet*, ne se rompait que sous 18 liv.; qu'avec un angle de flexion moindre il y avait réaction complète; enfin, que la troisième lame entièrement *recuite* pouvait former le même angle que la première trempée, et revenir à sa première position après une traction de 5 à 6 liv.; mais qu'avec 7 liv. la lame recuite se *rendait*, ne se relevant que de l'angle de 6 liv., en sorte que son 0 de repos ou de départ se déplaçait, à chaque surcroît de flexion, de toute la quantité au delà de 6 liv.

Ceci paraît confirmer la méthode d'employer en spiraux le fil d'acier plat, non trempé et dit *de bobine*, dont le laminage assure encore plus l'élasticité naturelle qui, moins étendue, il est vrai, que celle de la trempe revenue (*plutôt bleu que violet*), semble du reste aussi constante. Quelques-uns préfèrent les spiraux trempés, pour prévenir l'excès accidentel du mouvement circulaire qui, dépassant la limite d'élasticité sans trempe, peut déplacer le 0 de repos et mettre le régulateur *hors d'échappement*, avec une différence inévitable de marche. Des chevilles de renversement y pourraient obvier, si leur choc brusque était adouci par quelque moyen simple et facile. *Dans l'effet élastique on suppose un frottement.*

NOTA. On pourra poursuivre ces études de mécanique, 1° avec la Géométrie de *Clairaut*, annotée par *Garnier*, et les Traités d'algèbre; 2° la Mécanique de *Bossut;* 3° les OEuvres mathématiques de *d'Alembert;* 4° le Dictionnaire séparé de mécanique de M. *Borgnis*, faisant suite à son Traité complet de mécanique appliquée aux arts, et dans d'autres nombreux ouvrages.

FIN DE CES ÉLÉMENTS DE MÉCANIQUE.

CHAPITRE III.

DE L'ÉCHAPPEMENT.

1090. Dans les instruments mécaniques qui mesurent le temps, la partie la plus importante et la plus difficile à bien établir est sans contredit l'*échappement*. On nomme ainsi l'ensemble des pièces qui entretiennent immédiatement les oscillations ou les vibrations du *modérateur* du rouage (soit pendule, soit balancier), moyennant l'action de la dernière roue sur la pièce d'échappement, action que le modérateur lui-même permet ou suspend alternativement en temps égaux, en réagissant à son tour sur la roue. Dans cette combinaison d'effets mutuels, il importe que la force du rouage et l'action de l'échappement n'altèrent pas la régularité naturelle du modérateur, dont elles doivent seulement entretenir le mouvement. Cependant l'influence de certains échappements sert quelquefois à corriger les inégalités de la force motrice, suffisamment du moins pour l'usage civil, comme le prouve une longue expérience de l'échappement à cylindre et de quelques autres, malgré d'anciens préjugés (1).

(1) *F. Berthoud*, dans son *Essai*, qui fut son premier ouvrage, a nié positivement, là et ailleurs, cette propriété correctrice ; il s'est ensuite contredit manifestement en n'adoptant en dernier lieu que l'échappement à *cylindre* pour ses meilleures Montres à l'usage civil, et même pour la plus exacte de ses pièces marines ; mais il n'est jamais revenu, dans ses écrits postérieurs, sur la préférence qu'il avait donnée, dans l'*Essai*, à l'échappement à roue de rencontre, objet de ses premières études. L'*Essai* de Berthoud date aujourd'hui de près de 80 ans, et sa réimpression, 20 ans après, ne reçut ni corrections ni changements. On conçoit aisément ce que l'art a dû acquérir depuis par les recherches ultérieures et l'expérience.

Nota. Nous avions déja remarqué dans notre Préface que le siècle et le nom des inventeurs de l'échappement à roue de rencontre, et même de la *fusée*, moins ancienne, sont inconnus, et que l'époque trop éloignée de plusieurs inventions se perd dans la nuit des temps ; nous avions dit aussi que le *sablier* ne remonte, suivant le *P. Alexandre*, qu'à 1655 : *Traité général des Horloges*, p. 292. Cette citation a été contredite depuis, d'après l'autorité de *Winckelmann* : cependant *Chompré* et *Millin* disent que le *sablier* est un symbole moderne, et le Dictionnaire mythologique de *Noël* n'én parle pas. Quoi qu'il en soit, l'étude de l'antiquité n'étant souvent que conjecturale, on ne peut s'étonner des fréquentes contradictions et des erreurs des antiquaires, sans en excepter l'auteur allemand de l'*Histoire de l'art chez les anciens*, directeur jadis du musée du cardinal *Albani*, et qui, dans son retour d'un voyage en Allemagne, mourut assassiné par son valet. Il est parfois difficile de distinguer autrement que par le style les parties antiques d'avec les restaurations ou retouches modernes déjà vieillies, ou masquées par une *patine* adroite ; mais si quelques antiquaires y sont trompés, d'autres n'y regardent pas de très-près pour en imposer au public, témoin le fait suivant :

Sous l'Empire, un abbé italien, antiquaire renommé, vint se marier à Paris, *par suite d'affaires ;* un buste lui manquait pour compléter une collection antique des douze empereurs romains ; il proposa la substitution d'une autre tête antique à feu M. *Lange*, savant statuaire et chef de la restauration du musée parisien. — Mais, dit l'artiste, cette tête n'a jamais eu le signe impérial et caractéris-

1091. Dans les pièces fixes, le pendule est à la fois le *modérateur* et le *régulateur* du rouage ; ses oscillations, supposées libres et sans autre influence, sont produites par sa gravitation au centre de la terre : dans les pièces portatives, les vibrations supposées libres aussi du balancier, alors simplement *modérateur*, sont l'effet de l'élasticité d'un ressort spiral qui en est le *régulateur*. On sait que, dans ce cas de liberté, les excursions alternatives de ces deux mobiles diminueraient bientôt et finiraient par s'anéantir, si elles n'étaient pas entretenues par les fonctions de l'échappement. L'*élasticité* du spiral est au balancier ce que la *gravitation* est au pendule.

1092. L'échappement est, dans l'Horlogerie, ce qui a le plus exercé le génie des artistes; mais, dans les premières inventions de ce genre,, on ne cherchait guère à en analyser les effets : on ne considérait l'échappement que comme une sorte d'artifice industriel, simplement propre à ralentir l'écoulement du rouage produit par le poids ou la puissance motrice. On imitait ce qui avait réussi, souvent sans le bien comprendre, et l'on n'y arrivait que par une sorte d'adresse tâtonnée, d'après d'autres ouvriers qui n'en savaient pas davantage. Enfin, l'expérience et l'observation ayant fait apercevoir les inégalités et l'insuffisance des premiers moyens pour une mesure plus exacte du temps, on essaya plusieurs corrections et dispositions qui ont fait naître la grande variété d'échappements que nous allons passer en revue, et où, en voulant éviter un défaut, on tombait dans un autre. Nous ne rapporterons qu'une partie de ces essais, pour indiquer parfois l'origine de plusieurs constructions postérieures, et nous en signalerons en peu de mots les principaux inconvénients, afin que ceux qui ont l'ambition de produire des *nouveautés* ne retombent pas en partie, ou même totalement, dans des constructions anciennes et fautives, sauf quelques effets simples et réguliers, ou qui pourraient le devenir par d'habiles modifications. Mais la plupart de ces conceptions anciennes seront plutôt des exemples de ce qu'il importe d'éviter.

Pour compléter le tableau, nous mentionnerons aussi des compositions modernes de ce genre : mais nous n'exposerons ici qu'une esquisse de toutes ces figures, et nous réserverons pour les articles des régulateurs astronomiques à pendule et des pièces civiles perfectionnées, les explications et figures plus développées et nécessaires aux échappements que l'on emploie aujourd'hui. Quant aux esquisses moins exactes des anciens échappements, le lecteur déjà exercé pourra aisément en rectifier lui-même les rapports, d'après leur action indiquée dans le texte.

1093. Pour bien juger des compositions que nous allons parcourir, il est inutile d'y porter une connaissance assez avancée des conditions que l'on exige aujourd'hui dans un

tique (la tige de laurier dans la chevelure)! — Il n'importe, répliqua l'antiquaire, tâchez de me faire de celle-ci un *Héliogabale*, car il m'en faut absolument un !!! *Et puis fiez-vous à messieurs* les antiquaires! Nous tenons l'anecdote de l'artiste lui-même, le plus versé dans l'étude de l'antique, et qui pensait, du reste, sur le *sablier* comme le *P. Alexandre*. Nous avons connu intimement M. *Lange* à Rome et à Paris, et nous pourrions même, sous quelques rapports, nous dire son *élève*, comme aussi celui d'autres habiles artistes étrangers, et notamment de plusieurs pensionnaires de l'Académie de France à Rome à cette époque, et qui sont devenus depuis les maîtres et chefs d'école les plus distingués ! Suivant ces artistes, le *sablier* était un symbole moderne.

tel mécanisme. On demande d'abord que le modérateur soit suspendu le plus librement possible, et de manière à conserver, seul et sans l'échappement, ses oscillations ou vibrations pendant le plus long temps ; que la réparation de sa force ou puissance par l'échappement soit proportionnée à sa perte, en réduisant autant que possible les frottements ; que les effets s'y produisent en dégageant et non en arc-boutant, en glissant et non par une séparation perpendiculaire sujette à des adhérences variables, en évitant de multiplier les points de contact et les pièces de détail, dont quelques échappements modernes, surtout ceux à remontoir, ont été souvent surchargés ; en un mot, qu'avec toutes ces conditions, et plusieurs autres, les effets et le nombre des pièces soient les moindres et les plus simples qu'il se peut.

1094. On a divisé les échappements en trois classes distinctes : ceux dits *à recul*, comme avec la roue de rencontre et certaines ancres ; ceux dits *à repos*, comme avec le cylindre ou l'ancre de *Graham;* et enfin ceux à vibrations ou oscillations *libres*, autant que l'art le permet, et qui sont principalement destinés aux Horloges marines ou à longitudes, aux *garde-temps* portatifs, et autres pièces de ce genre où l'extrême précision est exigée.

1094 *bis*. Le *recul*, dans plusieurs échappements, sert quelquefois à corriger les inégalités de la force motrice ; mais comme il ne peut avoir lieu sans un frottement prolongé de va-et-vient, il introduit par là d'autres variations inévitables, moindres à la vérité que celles qu'il corrige, et qui, peu sensibles pour l'usage civil, ne conviennent pas néanmoins aux pièces d'observation.

1095. Un *repos* proportionné corrige assez heureusement aussi les inégalités de la force motrice pour l'usage civil ; mais il doit être réduit dans les pièces d'observation, où son frottement est aisément nuisible.

1096. Les échappements libres qui ont le moins d'inconvénients de ce genre, comme on le verra par la suite, exigent d'autant plus impérieusement la compensation des effets de température, et l'isochronisme des oscillations ou des vibrations.

1097. L'huile est presque toujours nécessaire dans les frottements, et cependant son épaississement avec le temps altère la régularité de la marche ; on doit donc chercher les moyens de lui conserver le plus longtemps possible sa fluidité, soit par la disposition des réservoirs, soit par les formes propres à la retenir aux points de frottement, sans que celui-ci soit augmenté par la disposition de ces formes.

1098. La suspension du modérateur est un objet de grande importance. Le balancier des Montres est suspendu sur des pivots dont la figure peut être modifiée en tendant à égaliser la marche dans les positions, soit verticales, soit horizontales, soit sur les côtés. Dans les pièces fixes, la grande pesanteur du pendule, qui constitue sa puissance propre, fait préférer aujourd'hui la suspension par deux ressorts courts, dont la force étudiée et combinée avec l'action de l'échappement peut contribuer à l'isochronisme des oscillations. Ces principales conditions d'un bon échappement et d'une bonne suspension, et plusieurs autres de détail que des explications ultérieures achèveront de compléter, sont d'autant plus difficiles à réunir, que l'on doit éviter la complication des effets ; et l'on sait que si

les compositions simples et bien conçues sont généralement les plus avantageuses, il est aussi plus rare de les rencontrer.

1099. Nous verrons bientôt, en effet, combien les premiers échappements étaient loin de remplir ces conditions, lorsqu'on négligeait l'influence de leurs dispositions diverses sur la marche du modérateur; nous n'en pourrons même distinguer qu'un très-petit nombre où l'on ait peut-être rencontré, plutôt que pressenti, le moyen de satisfaire aux principales conditions : ils ont survécu par ce seul avantage, et sont encore employés, mais avec des modifications modernes indiquées par l'expérience. Nous traiterons plus amplement ailleurs de la suspension du pendule *modérateur* et *régulateur*.

1100. L'échappement à roue de rencontre et à verge armée de deux palettes, le plus ancien connu, représenté figures 1 et 2 de la planche XXV, a été expliqué page 61 de notre première partie, et pages 137 et suiv., où l'on trouve les premières proportions régulières que lui assignèrent *Julien* et *Sully*. D'autres proportions plus modernes pour les Montres se trouvent au chap. VIII de cette première partie. Le principal défaut de cet échappement est d'être facilement influencé par les moindres inégalités de la force motrice, et d'exiger nécessairement une *fusée;* d'entrainer la nécessité d'un engrenage de champ toujours défectueux; d'occasionner rapidement l'usure latérale du trou du pivot de la roue de rencontre, etc. Cependant ce dernier trou et ceux du balancier peuvent être en rubis, comme les Anglais l'ont pratiqué pendant quelque temps. En réduisant le recul et la distance de la roue à la verge, ouverte à proportion, on préviendrait peut-être une partie des variations de la force motrice; on pourrait aussi ne pas admettre des pignons au-dessous de 10, pour faciliter le peu de recul restant alors dans les engrenages : ceux-ci seraient meilleurs avec des roues plus nombrées et à dentures plus fines, ce qui n'est pas aujourd'hui une difficulté.

1101. La figure 2 est l'application du même échappement aux anciennes Pendules d'appartement, après que *Huyghens* eut adapté le *pendule* à l'Horloge : ses trop grands arcs, qui réglaient mal, l'ont fait abandonner depuis longtemps; il est remplacé aujourd'hui par une ancre avec recul ou avec demi-repos. D'abord la simple suspension à soie, représentée dans notre planche III, y fut conservée, et même elle se pratique encore aujourd'hui; on y a substitué pendant quelque temps celle à couteau, et actuellement on la fait à ressorts, mais beaucoup plus courts que ceux de la planche XVIII, fig. 4. Le pendule indiqué, fig. 2 de la pl. XXV, n'a pas sa longueur réelle : on se réglera à cet égard, ainsi que pour la fourchette, sur la proportion de la planche III, ou de notre table des longueurs du pendule, dont l'explication se trouvera dans la suite de cet ouvrage. La fourchette est ordinairement le tiers de la longueur du pendule jusqu'à celle de demi-secondes (d'environ 9 po. 2 l.); mais elle est loin d'augmenter à proportion que la longueur se rapproche de celle du pendule à secondes (d'environ 3 pi. 8 l. 1/2), dont la fourchette ne dépasse pas 6 à 8 pouces. Nous reviendrons sur ce sujet en son lieu.

1102. Quant aux lames cycloïdales de *Huyghens*, destinées à raccourcir le pendule à mesure que les grands arcs le faisaient retarder, nous renverrons à ce qui en a été dit pages 77 et 78, première partie. Du reste, les propriétés précieuses de cette courbe ne furent

pas explorées en vain, comme nous l'avons dit en ce même endroit, et son emploi modifié est utile en divers cas; elle a fait naître la première époque de l'analyse du pendule. « Ce fut aussi peu après, dit *Lepaute*, que les courbes cycloïdales d'*Huyghens* furent abandonnées, MM. *de la Hire*, *Saurin* et *Sully* ayant contredit l'utilité et les avantages de leur application au pendule. »

1103. Un des premiers changements faits à l'échappement à roue de rencontre fut d'en transporter les palettes à l'axe de la roue d'échappement au lieu d'être à l'axe du balancier; alors la roue de champ fut taillée en dents inclinées rencontrant ces palettes, et l'ancienne roue d'échappement devint une simple roue de champ ou à couronne dentée à l'ordinaire, et engrenant avec un pignon porté par l'axe du balancier. Il en résultait une vibration de deux à trois tours entiers du balancier, assez lente pour durer une seconde. Cette disposition fut bientôt abandonnée, vu que les variations du frottement continuel en va-et-vient du dernier engrenage influaient trop sur la durée des vibrations. L'on peut voir ce qui en est dit sous le nom d'échappement à *pirouette*, page 96, première partie. (V. la figure 17, au bas de la planche II, à droite.)

1104. La figure 3, pl. XXV, représente le premier échappement à *ancre* et à *rochet* avec pendule à secondes, substitué aux précédents par *Clément*, Horloger anglais, vers 1680. Ce fut alors que l'on commença à obtenir quelque régularité constante de l'Horloge, l'ancre ne faisant décrire au pendule que de petits arcs. L'ancre B G A se compose de deux bras, dont l'un est terminé par une portion de courbe en A, convexe du dehors, et à peu près conforme à la courbe de la dent de ce côté; l'autre bras finissant en E est concave en dedans de E vers G; les dents F E du rochet agissent alternativement, par leur côté concave, sur les deux courbes ou *levées* de ces bras. Cet échappement est à *recul*. Les premières Pendules de ce genre furent appelées *royales*, en raison de leur plus grande régularité comparative. On trouve dans *Lepaute* l'observation suivante à ce sujet: « *Sully*, dit-il, remarqua une fois qu'en doublant le poids moteur d'une semblable Pendule, elle avait avancé d'environ une minute par jour, quoique les arcs fussent devenus plus grands, ce qui aurait dû la faire retarder: la force du rouage ajoutait à la gravité naturelle (du pendule) et accélérait les oscillations. Nous lisons dans les Mémoires de l'Académie que M. *Saurin*, l'un des géomètres de ce corps, ayant fait des expériences avec MM. *Lebon* et *Julien*, habiles Horlogers, trouva qu'en augmentant le poids de deux bonnes Pendules à ancre, l'une avançait et l'autre retardait, quoique les oscillations de toutes deux fussent devenues plus grandes; il en attribua la cause à la direction plus perpendiculaire de la dent E, par exemple, fig. 3, à mesure qu'elle parcourait en sortant l'arc (ou levée) en E, et dans le même effet sur l'autre bras. Le contraire avait lieu dans l'autre Pendule. M. *Saurin* conclut qu'en donnant à la courbe la figure d'une *développante de cercle*, tous les leviers devenant égaux, l'augmentation de poids ne devait plus produire de variation, et l'expérience de l'artiste justifia les réflexions du géomètre. Il remarqua cependant qu'il fallait courber un peu plus les faces (levées) de l'ancre, à cause de la variation successive de direction de la dent avec ces courbes, laquelle rend la force perpendiculaire plus grande vers la fin de l'arc. » *Traité d'Horlogerie* de Lepaute, pages 110 et suiv. (Il

faudrait chercher dans les Mémoires de l'Académie des détails plus circonstanciés de ces expériences, pour en tirer des conclusions utiles, mais peut-être moins applicables depuis les changements survenus à la forme de l'ancre.)

1105. Afin de ne pas négliger ce qui concerne le premier échappement à ancre qui succéda à l'ancienne routine, et qu'on emploie encore de nos jours, quoique fort diversement (car aujourd'hui la plupart des rochets agissent par la pointe de leurs dents, en sens de leur inclinaison, au lieu d'agir par leur côté courbe comme celui de *Clément*), nous rapporterons sur ce même sujet les réflexions de *Thiout*, avec la ponctuation et l'orthographe du texte pour ne pas risquer de dénaturer sa pensée : « Quoiqu'un échape-« ment bien fait avec un ancre aille parfaitement bien (dit-il), il ne peut pas aller si long-« tems sans être nétoyé que ceux qui sont faits sur le principe du levier, parce qu'il a « plus de frottement, surtout quand on veut que l'aiguille des secondes échape à distance « égale, et qu'elle recule peu. J'ai formé une petite démonstration que je crois suffisante « pour le prouver. J'ai pris un ancre de cette qualité, j'en ai tracé la figure 4 (V. pl. XXV). « Du centre je tire la ligne de direction A passant au point ou la dent du rochet frappe, « je prolonge la partie frottante de la palette qui donne la ligne C D du point d'intersec-« tion, je forme l'arc 0 55. Je trouve que la partie frottante de l'ancre est éloignée de la « ligne de direction de 55 degrés, par conséquent qu'elle perd 55 degrés de force, ou ce « qui est la même chose, que la palette a 55 fois plus de frottement que n'en a une pa-« lette formée de la ligne de direction. (*Nous ne garantissons pas la rectitude de ces « propositions.*)

« Pour mesurer l'autre partie de l'ancre, soit la ligne de direction E passant au point « de la courbe où la pointe de rochet touche, soit la tangente F 60, si du point d'inter-« section je forme l'arc H, je trouverai la tangente éloignée de la ligne de direction de « 60 degrés, et qu'il ne reste à cette partie d'ancre que 30 degrés de force quand elle « reçoit le choc d'échapement, par conséquent les deux côtés de l'ancre n'ont que 65 « degrés de force, de 180 qu'ils auroient s'ils étoient faits sur le principe du levier. On « a remarqué qu'un ancre ainsi formé ne varioit pas sensiblement en doublant le poids; « que si les faces de l'ancre avoient par exemple 5 degrés d'inclinaison de chaque côté, la « Pendule avanceroit de plusieurs minutes de son poids naturel à celui qui seroit doublé, « et au contraire elle retarderoit si les faces étoient plus inclinées : de là vient qu'il n'est « presque pas possible de pouvoir faire (rencontrer) deux pendules avec cet échapement « qui marchent également lorsqu'on double le poids.

« Pour continuer la description de cet échapement, fig. 3, sur la verge de l'ancre est « soudé une assiette pour y river la fourchette dans laquelle passe le pendule. L'usage de « cette fourchette est de maintenir le pendule en vibration en lui communiquant le mou-« vement qu'elle reçoit par l'échapement : on lui donne ordinairement une longueur ar-« bitraire, environ 6 pouces, pour un pendule de trois pieds. Le rochet est représenté « comme étant vu dans la cage étant retourné, ou ce rochet tourne à gauche. La face de « l'ancre A vient, par exemple, d'échaper, celle B baissant reçoit l'impulsion de la dent « qui avance sur l'extrémité de sa palette en raison que la vibration s'achève, la dent ar-

« rivant au bout de la palette B, elle échape à son tour, et celle A se présente pour rece-
« voir de son côté le choc de la dent, et ainsi successivement. Quoique cet échapement
« perde beaucoup de force, et que les frottemens en soient augmentés en même raison,
« cependant on s'en est toujours servi avec assez de succès.

« Les sieurs *Amiraud* et *Stolberg* ont une méthode de tracer cet ancre ; il décrive sur
« le papier un cercle divisé en 30 parties, sur lequel ils forment les dents du rochet ; ils
« prenent le quart du diamètre de ce cercle ou rochet qu'ils placent sur un des rayons
« eloigné du centre autant qu'il le faut pour que le cercle C B passe juste sur les deux
« pointes des dents du rochet E F. La même ouverture du compas etant portée perpen-
« diculairement au point I, ils forment la face de l'ancre E reportant le compas au point
« C, on a l'arc F A de l'autre partie de l'ancre ; par cette regle ils assurent qu'ils ont un
« échapement qui se fait en parties égales, et dont l'aiguille des secondes recule peu.
« Cette regle n'a cependant pas toute l'exactitude qu'on a besoin. » (*V. même figure 5.*)

Nota. Nous donnons fidèlement et sans corrections le texte et les figures de *Thiout*; car autrement, il faudrait être sûr de l'avoir bien compris, ce dont nous n'avons pas une parfaite certitude. On y reconnaîtra du moins combien la clarté est nécessaire en pareille matière, et l'inconvénient du défaut de précision et de sens de plusieurs ouvrages anciens, notamment de celui-ci, dont ce n'est pas un des passages les plus défectueux sous ce rapport, et c'est ce qui nous oblige à citer si scrupuleusement.

Thiout donne encore une longue démonstration en 5 grandes pages in-4°, du sieur *Enderlin*, pour former l'ancre d'un échappement à rochet, accompagnée d'une figure très-compliquée dont nous faisons grâce au lecteur, comme plus difficile à entendre que ce qui précède, et sans utilité probable. On la trouvera au besoin dans l'auteur cité (V. *Thiout*, t. Ier). *Enderlin* a pour but principal de produire les arcs du pendule par degrés proportionnels à ceux parcourus par la dent de la roue, comme si les degrés de puissance et de force de mouvement du régulateur (pendule ou balancier) ne venaient pas troubler et changer l'effet de ce rapport; cette recherche minutieuse des arcs parcourus, et qui ne paraît pas avoir de résultat bien sensible, est admise aussi, dans d'autres cas analogues, par quelques modernes, et rejetée par d'autres.

« La figure 5, continue *Thiout*, est celle d'un échapement du sieur *J. B. Dutertre*,
« maître Horloger à Paris. C'est un rochet qui engrenne dans deux palettes. Chaque pa-
« lette porte une portion de roue qui engrenne l'une dans l'autre ; ce qui fait que quand
« une palette échape, l'autre se présente pour retenir le rochet, et recevoir son action. Au
« centre de chaque palette est fixé un pendule, lorsque l'un vibre d'un côté, l'autre pen-
« dule va de l'autre ; de sorte que leurs vibrations ne peuvent jamais aller du même
« côté. L'auteur a prétendu que l'usage de cet échapement pourroit être fort juste dans
« un vaisseau. » (*Le contraire est assez connu.*)

Lepaute fait à ce sujet la remarque suivante, et il ne faut pas oublier que son livre a été revu, retouché et augmenté par le célèbre *Lalande*, dont le suffrage paraît autoriser, du moins en théorie, plusieurs opinions qui s'y trouvent répandues. « Il ne paraît pas naturel dans ce cas-ci, dit *Lepaute* ou *Lalande*, de vouloir corriger les inégalités

dont un pendule serait susceptible, en doublant la cause : c'est cependant ce qui arriverait; car chaque pendule, agissant avec une très-grande force, ne peut manquer de communiquer à l'autre une partie de ses variations. Un ancien échappement à deux balanciers qui engrènent ensemble, dans de grosses Horloges d'Allemagne, a pu être l'origine de tout ce qu'on a fait de semblable ou d'analogue depuis ce temps-là. » On pourrait ajouter que si les variations sont égales et en sens contraire dans chacun des pendules, elles pourront parfois se neutraliser; mais que si les variations sont dans le même sens, le défaut pourra en être augmenté, et qu'avec cette incertitude on ne devra compter tout au plus que comme sur la marche d'une Horloge simple : d'où il suit que ce travail double, d'autant plus long et dispendieux qu'il exige une parité scrupuleuse dans les deux mouvements, est en pure perte. En effet, cette tentative, renouvelée de nos jours en Montre et ensuite en Pendule, n'a produit aucune amélioration, et semblait même moins constante dans ses effets qu'une bonne pièce simple du même genre. Ce sont encore là de ces espérances trop hâtives que nous avons déjà signalées ailleurs, et surtout à la fin d'une note de l'article 974, comme n'ayant pas été assez méditées avant l'exécution.

1106. La figure 6 représente un échappement exécuté à Rome. L'axe du dernier pignon porte carrément le chaperon A, dont une cheville porte le bras de la bascule A B C, mobile en C sur le sommet de la fourchette C D G, prolongée au-dessus de son centre de mouvement D. Le chaperon A continuant de tourner du même sens, comme un volant de sonnerie, produit ici l'effet d'une manivelle qui oblige la fourchette G C d'osciller en E et en F et de communiquer son mouvement, par la cheville G, au pendule non représenté. V. sur ce sujet la fin de l'article suivant :

1107. La figure 7 offre un échappement du même genre d'un abbé *Soumille;* le chaperon DB, roulant aussi dans le même sens et fonctionnant comme manivelle, élève et abaisse alternativement la tige D D qui fait osciller le rayon de la pièce A fixée au pendule suspendu à couteau. La coulisse du rayon en D du mobile supérieur permet d'éloigner ou de rapprocher à volonté de son centre la cheville, qui règle ainsi l'étendue des oscillations. Ces deux constructions rapportées par *Thiout*, et faites dans le même esprit, paraissent être du même auteur ou imitées l'une de l'autre; elles ne peuvent que brider et entraver la liberté du pendule (1).

1108. Le seul avantage de ces deux échappements était, suivant *Thiout*, de ne point faire de bruit, et de convenir sous ce rapport aux Pendules d'alcôve; mais cet effet existait déjà dans le pendule circulaire de *Huyghens*, disposition ingénieuse et savante dont *Thiout* donne une esquisse fort imparfaite dans la figure 8 suivante; il se borne à dire que : « les révolutions du pignon y sont réglées par le pendule oblique A, tournant tou-

(1) Cette tentative s'accorde assez avec ce que nous avons dit des Horlogers de l'Italie dans la note de l'article 474; et si le reste de l'Europe y a puisé les premiers principes des arts d'imitation d'après les grands artistes italiens et les belles statues enlevées à la Grèce par les Romains, elle n'y cherchera pas aujourd'hui la perfection des arts mécaniques. Cependant l'Italie a produit *Galilée* et une foule d'autres hommes de génie en divers genres, et nous a donné, avec les premières leçons d'architecture, des modèles d'échafaudages simples, légers, solides et très-ingénieux : les sciences et les arts mécaniques n'y manquent que d'institutions favorables; l'esprit y est naturellement droit et habile.

jours sur lui-même dans un seul sens, et qui (en ouvrant son angle d'obliquité à l'aide du ressort B) s'écarte d'autant plus qu'il tend à tourner plus vite, de sorte, dit-il, que ce régulateur se règle par lui seul. » C'est ce que l'on pourrait dire aujourd'hui du régulateur à deux masses de la machine à vapeur, qui s'écartent par la force centrifuge et sans le prétendu ressort de *Thiout*. Mais nous en avons parlé autrement, page 82 et suiv., première partie, en renvoyant les détails explicatifs à l'article où nous traiterons de cette savante construction ; nous rappellerons seulement ici que le *pendule circulaire de Huyghens* est encore en usage sur plusieurs points de l'Allemagne, avec une suspension tout autre que celle d'origine, et qu'on en obtient une marche fort régulière, ce que *Thiout* paraît avoir complétement ignoré : nous reviendrons donc ailleurs sur ce sujet, beaucoup plus intéressant que notre auteur ne l'a pensé, et qui donna lieu à plusieurs recherches et théorèmes estimés de *Huyghens* sur la force centrifuge.

1109. Les figures 9 et 10 offrent l'échappement à deux leviers et à *recul*, adopté pendant quelque temps comme susceptible d'une assez bonne marche, quand les leviers ont la longueur du rayon de la roue que leur assigna *Julien*, qui essaya, dit-on, de le perfectionner pour le pendule à secondes (la première idée en est attribuée au chevalier de *Béthune*). L'on comprend aisément avec ces figures que, par la communication des deux bras dont l'un peut porter un rouleau et l'autre une fourchette, comme dans les figures 5 et 6 de notre pl. XVIII, ou de simples bras d'appui avec vis de rappel, comme figures 9 et 10, pl. XXV, une des palettes ne peut être écartée d'un côté par la roue, sans que l'autre ne rentre dans l'intervalle des dents de son côté. Cet échappement a été construit de diverses manières qui nécessitent toujours, comme celles-ci, deux axes et par suite deux pivots de plus, sans compter ceux du rouleau et son adhérence inégale à ses points de contact, ou bien le frottement du bout de la vis de rappel ; il en résulte que, si cet échappement peut convenir à un régulateur ordinaire, ses frottements ne conviennent nullement aux pièces de précision. *Thiout* dit l'avoir appliqué le premier en 1727, et qu'il fut adopté par la plupart des Horlogers qui en eurent connaissance. « Je prends, dit-il, le « *tiers* du diamètre du rochet que j'ajoute à sa circonférence (*il veut dire :* à son rayon) « pour tracer l'arc F B (*fig.* 9), ensuite je prolonge les rayons des dents sur lesquels je « forme des leviers en plaçant celui A (*lisez :* le centre A) à trois dents et demi de la ligne « perpendiculaire B, je donne la longueur convenable au levier B, pour échaper de la « dent G et *r*, et je donne la même longueur au levier A. Par ce moyen j'ai les *coudes* des « leviers et la longueur de leurs bras qui répondent parfaitement à l'expérience. La fi- « gure 10 est une autre addition pour diminuer le frottement de la vis E *c* sur le bras du « levier A (de la figure 9) par le moyen d'un rouleau et d'une lame qui le touche. » Nous rapportons ces détails un peu obscurs de *Thiout*, pour ceux qui voudraient employer cet échappement que nous avons vu marcher avec assez de régularité pour une Pendule ordinaire à secondes sans compensation ; le succès dépend de la *proportion* des leviers *avec le poids et la longueur du pendule*.

1110. « La figure 11, continue *Thiout*, est un régulateur. Sur les croisées du balan- « cier sont deux boules A B qui vont du centre à la circonférence pour augmenter les vi-

« brations. » Cette disposition suppose un *balancier* équilibré, dont l'arc total n'arrive pas à 180°; le roulement inégal des boules qui, adhérant même à sec comme les rouleaux, ne tombent pas toujours avec la même vitesse, ne promet guère ici de précision. *Ceci suppose une machine fixe, et a peu réussi dans d'autres cas,*

1111. La figure 12, probablement inexacte dans *Thiout*, paraît entachée de quelque contre-sens dans son dessin, car les deux rochets menés dans le même sens ne pourraien suspendre l'écoulement du rouage. *Thiout*, sans s'expliquer à ce sujet, se borne à dire que « cet échapement n'est bon que pour faire voir qu'on ne peut en faire un sur le principe du levier (*lisez :* des deux leviers) sans augmenter la mécanique, au moins d'un mobile, » etc. Observation superflue que l'on a dû faire sur les figures précédentes, et suivie d'autres détails qui deviennent ici inutiles (1).

« La figure 13 est une disposition de *J.-B. Dutertre* qui n'a qu'une seule palette dont « la tige porte la fourchette. Les deux rochets sont fixés sur un même arbre; quand la « palette échape du petit rochet, le grand qu'on peut appeller rochet d'arrêt appuye sur « la tige de la palette et laisse la vibration assez libre. La palette revenant joindre le « petit rochet, la tige ou cylindre qui est entaillé jusqu'au centre, laisse passer le rochet « d'arrêt, et la vibration acquiert une nouvelle force, de sorte qu'en deux vibrations il « n'y en a qu'une d'accelerée; ce qui fait croire que la moitié des vibrations étant inde- « pendante du rouage, et de ses inégalités, qu'elles seroient moitié plus justes que les « autres; mais l'expérience ne le confirme pas. » Il y a l'inertie d'une double roue.

« Figure 14 est un échapement à deux balanciers. A et B sont deux cercles qui se « meuvent avec les palettes fixées sur leurs arbres. Les deux petites portions de rateaux « engrennent l'une dans l'autre et les deux grandes engrennent dans des pignons placés « au centre des cercles de balancier. L'échapement se faisant avec les deux bras de le- « viers a l'ordinaire des autres, oblige chaque balancier à tourner plusieurs tours, et « toujours en sens contraire. On peut donner à chaque cercle son ressort spiral, et les « disposer de manière qu'ils ne feroient qu'une vibration par seconde. » Il est facile d'observer ici qu'avec trois engrenages les variations de frottement sont excessivement multipliées, puisqu'un seul engrenage de ce genre en produit déjà trop.

« Figure 15 est un échapement à deux balanciers à l'usage des Montres, imaginé « par le sieur *J.-B. Dutertre*. Ces deux balanciers qui engrennent l'un dans l'autre sont « sur la platine de dessus, de même que le double rochet. Ces trois pièces sont soute- « nues chacune par un cocq. Sur les croisées des balanciers sont placées les palettes « D E, et les tiges des balanciers ont chacune des entailles pour laisser passer les « pointes du grand rochet. Voici comme il agit. Quand la pointe 2 rencontre l'en- « taille de la tige du balancier, elle passe, la dent 3 du petit rochet frappe la pa- « lette D, et fait vibrer les balanciers; la grande pointe 4 est retenuë sur la tige du « balancier A, l'entaille se présentant au retour de la vibration, elle passe, et la dent « 3 va frapper sur la palette E; étant échapé, la pointe 5 est retenuë par la tige du

(1) On sait que, dans ces figures de *Thiout*, il faut suppléer aux fausses directions des plans, lignes, etc.

« balancier B, et ainsi successivement. Sous l'un des balanciers est placé un ressort « spiral à l'ordinaire. Cet échapement ne peut vibrer sans ressort spiral, et il faut le « considérer comme double et partagé en deux temps. Les propriétés de cet échape-« ment sont tels que les secousses ne dérangent pas sensiblement les vibrations. La « pression que les dents du rochet d'arrêt font sur les cylindres corrige l'impulsion « que le balancier reçoit par le rouage ; ce qui fait que la force motrice étant doublée, « les vibrations n'en sont pas beaucoup dérangées. » Le frottement de l'engrenage transporté ici à la circonférence des balanciers n'en est que plus défectueux ; il y faudrait du moins deux spiraux. Cette idée, étant réduite à un seul balancier, semblerait avoir beaucoup d'analogie avec l'échappement *Duplex*.

PLANCHE XXVI.

1112. La figure 1 représente l'échappement *à levier* de *Sully*, et en partie ses dispositions principales. Il fut remarqué dans son temps et depuis, parce que l'inventeur espérait l'appliquer aux Horloges marines. « Le régulateur de cet échapement est d'une « forme singulière, dit *Thiout*, et il ajoute avec une teinte de rivalité : « Le S[r] *Sully* « l'auteur en a été si épris, qu'il ne comptoit pas moins que de trouver les longitudes « par son moyen. Voici les qualités qu'il lui donnoit : 1° De remedier parfaitement aux « variations provenantes de la dilatation et retrecissement des métaux causée par le chaud « et par le froid. 2° Les variations causées par l'inégalité de la pesanteur des corps en « divers endroits du globe terrestre. 3° De conserver un parfait isochronisme aux arcs des « vibrations de diverses grandeurs, et de quelque cause que cette diversité puisse pro-« venir. 4° Que l'Horloge suspendue dans un vaisseau devoit maintenir une justesse aussi « grande et aussi constante que celle d'une Pendule à secondes sur terre. Ce régulateur « est composé d'un levier T Z et d'une courbe..., etc.

« Le nombre d'experiences que l'auteur a fait n'ont apparemment pas réussi selon qu'il « se l'étoit promis, puisqu'il a abandonné de lui-même ce nouveau régulateur. En effet, « il ne se trouve pas avoir tant d'action sur le balancier que le ressort spiral, et il est bien « éloigné d'avoir autant de propriétés... »

1113. Nous entrerons ici dans quelques détails sur cette construction recherchée qui a fait époque, comme propre à servir au moins d'exemple des erreurs dans lesquelles peut aisément tomber un homme de talent qui a même déjà quelques degrés d'instruction ; le danger est bien plus grand pour ceux qui n'en ont pas du tout. Nous ne prendrons pas ces détails dans *Thiout*, que ses expressions rendent un peu suspect de partialité, mais dans l'ouvrage de *Sully*, qui va parler ici lui-même.

« ABCDE est la platine du derrière de la machine, *ef* est une ouverture circulaire faite dans la même platine pour voir le jeu des pièces en dedans. GHI marquent le cercle du balancier vertical, compris entre les deux cercles ponctués ; il est posé à environ 3/4 de pouce en dedans de la platine ci-dessus ; l'axe est horizontal, long de 3 pouces environ, et s'étend depuis l'autre platine (du devant de la cage) où il tourne sur un pivot,

jusqu'à environ 3/4 de pouce en dehors de la platine de derrière, celle figurée ici, qui doit porter un coq, non représenté, lequel ne reçoit point le pivot, mais contient seulement l'axe en sa place. *m* 1 est un grand cercle de laiton que, eu égard à son usage, j'appelle rouleau ; il est posé à un quart de pouce en deçà du balancier HI, et *m* 2 en est un autre de même, posé un peu en deçà de *m* 1, tous les deux en dedans de la platine ABCDE, et à peu près également distants de la platine et du balancier. Les axes des rouleaux ont chacun un pouce et demi de longueur ; leurs pivots en dedans portent sur deux coqs posés en deçà du balancier, et leurs pivots en dehors sur deux autres coqs posés en dehors de la platine et non représentés pour éviter la confusion. En C où est l'axe du balancier, cet axe forme une espèce de pivot, ou plutôt un col tourné dans l'axe du balancier, du diamètre d'une ligne, lequel appuie sur les circonférences des deux rouleaux, *m* 1 et *m* 2, à leur point d'intersection au-dessous de C. Ce pivot tournant avec le cercle de balancier de côté et d'autre, donne aussi aux rouleaux un petit mouvement alternatif de rotation.

« Sur le même axe ou arbre du balancier, continué comme ci-dessus jusqu'à 3/4 de pouce en avant de la platine ABCDE, est attachée la double courbe S, à laquelle est jointe l'aiguille *o* avec sa lentille ou poids *n* qui tourne à vis sur la tige de l'aiguille pour contre-balancer le poids des courbes. De manière que le balancier, les courbes, l'aiguille et sa lentille doivent faire ensemble un parfait équilibre.

« T *y* Z est un levier qui a une boule Z au bout, et dans son milieu l'arc *y y*. T est une lentille où entre à vis l'autre bout du levier continué au delà du centre *x*; son usage est de régler la durée des vibrations en approchant ou en éloignant cette lentille T de *x*, et en même temps de faire appuyer le pivot ou centre *x* en contre-bas sur l'intersection des deux rouleaux *r r* dont l'axe *x* se détacherait en contre-haut, sans le poids T. Imaginez à présent deux autres rouleaux comme *r r* sur lesquels porte le pivot intérieur du balancier ci-dessus, que j'ai supposé d'abord rouler dans l'autre platine du devant de l'Horloge. Il faut imaginer de plus un coq pour recevoir les deux pivots des rouleaux *rr* et pour contenir *x* qui a en arrière une tige traversant la cage. Son pivot de ce bout roule dans la platine du devant ou du cadran qui ne se voit pas.

« KBL est un arc de la platine découpée ABCDE, divisé en 90° de B vers A, et de même de B vers C. Lorsque la machine est arrêtée, l'aiguille C*o* sera en B ou zéro; et les courbes, lui étant toujours opposées, seront par conséquent en bas, et la ligne ou fil SS deviendra une ligne droite et perpendiculaire à la ligue horizontale ponctuée *xx*, dans laquelle se trouvera alors l'axe du levier *xy* Z.

1114. « Pendant les vibrations, le fil SS devient alternativement *tangente* aux courbes, et l'est toujours à l'arc *yy* en élevant ou en laissant abaisser par son propre poids le levier *xy* Z. Par le rapport à volonté entre le poids du levier et celui du balancier, la machine peut battre les secondes. Les variations de température ne peuvent changer les rapports de longueur et d'équilibre des deux bras du levier, dont le poids Z augmenté à volonté accélérera les vibrations du balancier, tandis que le cercle du balancier rendu plus pesant le fera retarder ; mais une augmentation proportionnelle du poids des deux

mobiles ne changera pas leur rapport : d'où il suit que la variation de pesanteur, sous es diverses latitudes, n'en peut altérer la marche. » (*Suiv. Sully.*)

1115. L'auteur ajoute qu'avec une bonne suspension (du corps de la machine) les mouvements du vaisseau ne produiront pas autant d'effet sur son Horloge que ceux d'une berline sur le pavé, dans laquelle elle a été transportée au trot pendant deux lieues, sans avoir varié de plus d'une seconde ; que le fil de connexion SS peut être remplacé par une chaîne de montre rendue souple, etc. Il dit aussi que pendant huit jours d'épreuve à l'Observatoire, l'Horloge n'a varié que de 19 secondes (on doit remarquer que c'est déjà beaucoup trop).

1116. Au moyen des deux figures des courbes tâtées de l'échappement, représentées à droite et à gauche du haut de la figure 1, l'auteur explique ailleurs sa manière d'obtenir l'isochronisme des vibrations, etc., et les modifications possibles des courbes, indiquées dans ces figures, la font aisément concevoir.

1117. La figure 2, au-dessous, représente le profil de l'échappement de l'Horloge de *Sully*. AA est le cercle du balancier ; S les courbes isochrones ; C leur contre-poids, *rs* sont deux cercles d'agate ouverts pour laisser passer à chaque vibration une dent de la roue, mais avec des plans inclinés opposés servant de levée, en sorte que, lorsque la dent *q* échappe au plan incliné du cercle *r* vu en profil, l'autre dent I tombe sur le plan du cercle *s* où elle éprouve un repos, jusqu'à ce qu'elle rencontre le plan incliné de sa levée, d'où elle glisse avec réparation du mouvement du balancier, pour tomber sur le repos du plan *r* qui l'arrête de nouveau, jusqu'à ce que ce plan *r* lui présente à son tour sa levée inclinée pour une nouvelle réparation en sens contraire, et de même pour les dents et les vibrations suivantes.

« Un Horloger du temps, dit *Thiout*, a voulu perfectionner cet échapement en formant la pointe des dents en crochet rabattu pour diminuer l'étendue du frottement, mais on conçoit qu'il auroit suffi d'incliner davantage les dents de la roue. » On peut ajouter qu'il fallait aussi réduire le diamètre des cercles, pour établir le frottement plus près du centre, avec moins d'espace parcouru pendant les repos.

1118. Malgré les soins et le talent de l'auteur, cette Horloge varia beaucoup, et son échappement fut vainement modifié. « L'Horloge de *Sully*, dit *Lepaute*, était travaillée dans la dernière perfection, et marcha pendant plusieurs semaines avec une extrême justesse ; tous les curieux, français et étrangers, s'empressèrent à en avoir ; il recueillit un grand nombre de souscriptions au moyen desquelles il rassembla beaucoup d'ouvriers... Mais, dans le cours de ses travaux, il s'aperçut que son Horloge cessait d'aller régulièrement (même dans une position fixe) ; les frottements de son échappement, devenus variables au bout d'un certain temps, en étaient sans doute la cause, et il fut enfin obligé de l'abandonner pour y substituer l'échappement à roue de rencontre. » (Il s'adaptait plus facilement à la disposition primitive de ses mobiles.)

1119. Dans cette composition de *Sully*, il y avait des erreurs notables en physique, science que l'habile auteur ne possédait pas assez, et d'ailleurs l'expérience du genre manquait encore. La différence de pesanteur, par les latitudes, opérant sur la masse du

levier et nullement sur l'inertie du balancier, faisait varier leur rapport ; l'action du levier variait aussi par les situations diverses de l'Horloge et par les mouvements du navire; l'échappement avait trop de frottement, etc.: c'est à peu près ce que *Graham* consulté avait prévu (note de l'art. 974). Nous n'entrons dans ces détails qu'en raison de la réputation de l'auteur, et de la sensation que son invention produisit d'abord. C'est du reste un exemple utile de la difficulté de la question, dont quelques inventeurs de nouveaux échappements ou d'autres constructions insolites ne paraissent pas assez se défier ; et cependant *Sully* avait du talent, de l'imagination et même de l'exécution, ce qui ne suffit pas sans le savoir et l'expérience.

1120. La figure 3, pl. XXVI, est tirée par *Thiout* de la *règle artificielle du tems*. « Il « est composé, dit-il, du levier K, d'un arbre N qui porte l'*équilibre* Q, et le rouleau M. « Quand la palette K est mue par le rochet, son bras O qui porte une vis avec son assiette, « appuye sur le rouleau M, ce qui l'oblige de baisser; il se releve quand la vibration re« vient ; et lorsque la palette K échape, le demi cercle *r* présente sa rondeur à la dent du « rochet pour le retenir, pendant que la vibration s'acheve librement. Quand elle revient, « le demi cercle *r* dégage le rochet pour le laisser fraper sur la palette K, de sorte qu'il « paroît que la moitié des vibrations sont indépendantes du rouage, mais c'est ce que « l'expérience ne prouve point. » La roue à rocher dans cet échappement agit par les pointes de ses dents sur le levier ou palette K. (*V. ci-après.*)

« Figure 4 est un échapement que j'ai composé sur le même principe. La tranche cy« lindrique A présente sa convexité aux dents du rochet pour les retenir lorsque la pa« lette B est échapée, et la vibration revenant, la tranche cylindrique permet au rochet « de tourner, et la palette B se présente pour recevoir le choc d'échapement. Le pendillon « C porte une cheville qui traverse le pendule par une fente qui y est faite pour le main« tenir en vibration. » La roue agit en dedans de B par le côté concave de ses dents. Ces deux échappements n'ont pas été plus employés que le suivant :

« Figure 5 est un autre échapement à une palette. Le crochet A retient le rochet R « pendant que la vibration se fait. Il doit être aussi libre que l'ancre à repos de l'échape« ment des Pendules du sieur *Graham*. » Les dents agissent par leur côté concave.

1121. La figure 6 est, suivant *Thiout*, l'échappement à cylindre de *Graham* pour les Montres ; mais il y est singulièrement défiguré. Les dents n'y ont de plan d'impulsion que vers leur pointe, et le reste de la dent, passant sans action sur les lèvres du cylindre, produirait une énorme chute, que l'auteur anglais était bien éloigné de se permettre. Nous y avons indiqué provisoirement sur 3 dents la vraie forme pointillée des levées portées par la roue. Le cylindre figuré ici en plan pour diverses positions devrait avoir ses lèvres au moins arrondies, et diversement d'un côté à l'autre, etc. Nous avons fait copier exactement cette mauvaise figure de *Thiout*, en preuve de la négligence de ses planches, où les lettres de renvoi sont souvent ou fautives ou manquantes, etc. La partie de profil de la roue en F a ses dents amincies sur le devant, et nous en avons indiqué le rétablissement d'épaisseur au pointillé. Le cylindre en G à gauche de la figure 6 n'est pas plus exactement dessiné ; il ressemble aussi peu à ce qu'on en connaît généralement. *Thiout*

entre ensuite dans des détails d'exécution tout différents de ses figures. Cet échappement, supérieur de beaucoup à ceux avec lesquels il se trouve mêlé ici, sera représenté plus en grand, avec sa véritable forme et proportion, dans une autre planche, à la suite de sa description particulière et suivant la meilleure exécution actuelle. Nous en avions déjà donné une première idée dans notre pl. VII, à l'occasion de la Montre à répétition de *Berthoud ;* et quoique la perspective défigure les proportions et ne permette pas d'y prendre des mesures, les formes indiquées n'y ont pas du moins les contre-sens de celles de *Thiout. V. par la suite la pl. annoncée.*

1122. Cependant cet auteur rachète en partie ces inexactitudes par la manière vraie dont il rend compte des qualités de cette invention : « Je ne connais point, dit-il, d'échapement « de Montre qui renferme tant de propriétés que celui-ci. 1° Il est aussi simple que celui « à roue de rencontre. 2° Il n'est point sujet au contre-battement, au renversement, ni à « l'accrochement quand même les trous s'agrandiroient. 3° Il n'est pas beaucoup susceptible des inégalités de la force motrice ni de celle du rouage. 4° Les engrenages des « dernières roues sont plus constants que ceux des roues de champ. 5° La Montre se règle « plus facilement sur toutes les positions. 6° Enfin cet échapement n'est pas si sujet à se « déranger que les autres qui engrennent par la suite plus à une palette qu'à l'autre. » *Thiout* ajoute qu'à la vérité il faut nettoyer ces sortes de Montres plus souvent que celles à roues de rencontre. Il est surprenant qu'après avoir si bien apprécié cet échappement la figure en soit aussi fautive.

1123. « La figure 7, dit *Thiout*, est un échappement à deux repos de M. *Flamenville*, « qui a fait l'attention de beaucoup d'Horlogers d'Angleterre, où il a été exécuté pendant trois ou quatre ans. Cet échapement a plusieurs qualités de celui de M. *Graham*, « on l'a appliqué à des Montres que l'on a estimé n'avoir varié que de quelques secondes « dans un mois. Son défaut est d'être trop susceptible de variations lorsque l'huile devient « épaisse. Cet échapement est formé d'une verge qui porte deux cylindres A B sur lesquels on forme les palettes en les entaillant jusqu'au *centre parallèle*. Quand la palette « A, par exemple, a échapée, celle B présente sa rondeur à la dent qui appuye dessus, « pendant que l'aller et le retour de la vibration se fait à l'aide du ressort spiral. Lorsqu'elle est revenue, la coupe ou palette se présente pour donner prise à la dent qui « agit par ce moyen à accélérer le retour de la vibration, pendant que le cylindre A retient la roue de rencontre, et ainsi de suite. »

Cet article séduisant semble *promettre*, mais son obscurité et son insuffisance, avec une contradiction palpable à la fin, ne permettent de l'éclaircir que par des conjectures ; elles nous avaient amené, en effet, à supposer que le diamètre de chaque cylindre devait être un peu moindre que la moitié de la distance entre deux dents de la roue ; que celle-ci devait être en nombre impair, et que le fond des entailles devait être assez concave pour prévenir le collement des surfaces droites, etc. Un artiste ancien et expérimenté (1), qui a eu jadis entre les mains une Montre portant cet échappement, a complétement confirmé notre supposition ; ce qui prouve que la figure 7, d'après *Thiout*, diffère, suivant son ha-

(1) M. *Becquerel*, déjà cité, page 109 et article ou paragraphe 145.

bitude, des vraies proportions, autant que son explication est inexacte ; nous y avons souligné, par exemple, les deux mots : *centre parallèle* comme devant être un peu *étonnés de se rencontrer ensemble;* d'autre part, la coupe ou palette B ne pourrait recevoir d'action à son retour, si, comme le dit positivement *Thiout* à la fin, le cylindre A retenait la roue de rencontre ; mais avec un nombre impair dont il ne parle pas, et la réduction ci-dessus des cylindres de cette figure inexacte, l'effet devient praticable. Du reste, quand on trouverait le moyen de conserver davantage l'état de l'huile aux parties frottantes, il resterait toujours ici l'engrenage défectueux de la roue de champ; on sait que son exécution régulière et géométrique ne peut être appliquée rigoureusement dans les Montres, et, sous ce seul rapport, le cylindre de *Graham* serait préférable.

1124. La figure 8, échappement de *Enderlin*, a sa roue garnie des deux côtés de chevilles alternées, longues et pointues, dont l'une, par exemple, est en repos sur la portion de cercle B terminée par un plan incliné ou levée, d'où cette dent échappe pour faire reposer la dent suivante de l'autre côté, sur le repos de la partie de cercle C qui porte aussi sa levée. Ces repos trop éloignés du centre ont beaucoup de frottement, et, suivant l'expérience, la résistance en est très-variable.

1125. Dans la figure 9, le même auteur a remplacé sa roue à longues chevilles par deux autres roues à dents inclinées et alternées ; il a réduit son cercle et rapproché ses repos du centre, comme sur un seul cercle de l'échappement de *Sully*, et portant alors les deux plans inclinés ou levées. Mais le frottement y est encore trop sensible, comme dans celui de *Sully*, qui fut forcé de l'abandonner : deux roues chargent toujours trop un dernier mobile. Les deux roues de l'échappement *Duplex* bien postérieur, dont l'inertie était le défaut, ont été réduites judicieusement à une seule roue, avec de simples chevilles.

1126. La figure 10, dont l'auteur porte le nom de *Vergo*, indique deux roues d'échappement engrenant ensemble et portant des chevilles alternées. La pièce d'échappement C est fixée à la tige de la fourchette et reçoit successivement l'action des chevilles sur ses deux plans inclinés servant de levées. *Thiout* dit que cet échappement vibre bien en Montre ; mais il semble à d'autres que son recul trop dur serait même défavorable en Pendule. Cette construction paraît du reste avoir donné la première idée de plusieurs autres analogues, mais qui ont de plus des repos manquants ici. *Une amélioration importante pour la régularité peut avoir plus de prix qu'une invention médiocre.*

1127. La figure 11 est un échappement à deux leviers de *Thiout* aîné. « Le bras B retient le rochet en repos pendant une vibration plus libre du pendule ; l'autre bras A, lié avec la fourchette du premier comme en charnière, reçoit seul l'impulsion ou réparation. » Destiné aux Montres, cet échappement ne marche point sans spiral ; nous en trouverons l'idée très-améliorée dans les premiers échappements libres. A est l'axe du balancier.

1128. La figure 12 est, suivant *Thiout*, un ancien échappement d'Allemagne à recul, composé de deux roues engrenant ensemble, et portant chacune une palette. Il y a deux balanciers droits équilibrés et comme à folliot ; V. celui cité par *Lepaute*, avant notre art. 1106 ; on voit qu'on ne connaissait alors ni le *pendule* ni le *ressort spiral.*

1129. La figure 13 représente une verge d'échappement à roue de rencontre pour les grosses Horloges auxquelles on a conservé ce mécanisme. On y a disposé des boîtes ouvertes à angle droit l'une de l'autre, pour y recevoir des palettes de rechange, que l'on peut tremper *très-dur*, et remplacer quand elles viennent à s'user, ce qui arrive promptement dans ces machines, où les mobiles sont très-pesants, les poids moteurs souvent en excès, et les chutes de l'échappement d'autant plus fortes et violentes. *La dureté bornée des métaux ne suit pas la proportion des forces employées.* Heureusement on n'exécute plus d'Horloges avec cet échappement; mais on est souvent forcé, par économie, de laisser l'ancien mécanisme dans les réparations, et cette verge en est un moyen palliatif.

1130. La figure 14 représente l'échappement à ancre et à repos pour les Pendules, composé par *Graham*. « La règle que j'ai trouvée, dit *Thiout*, et qui me paraît assez « convenable pour le former, est d'*éloigner le centre de l'ancre de la circonférence du* « *rochet* de tout le diamètre de ce rochet, comme la figure le présente. Il faut placer son « centre sur la ligne perpendiculaire, ensuite diviser le rochet en 30 parties, en commen- « çant par ladite ligne perpendiculaire, et prendre les dents dont le rayon rencontre le « levier en tangente sur un arc décrit du centre de l'ancre pour former les palettes, et « faire que l'aiguille des secondes ne recule point. Voici comment cet échapement agit. « La partie A vient, par exemple, d'échapper, celle B reçoit sur la partie circulaire le « choc de la dent du rochet; la vibration se faisant, la palette s'enfonce *beaucoup* dans « la denture, qui est assez profonde pour que l'ancre ne touche pas le fond. La « vibration revenant, le rochet reste toujours immobile, et n'a d'action que lorsque le « plan incliné se présente; pour lors, la dent du rochet cesse d'être fixe, en suivant l'in- « cliné de la palette, ce qui *oblige* l'ancre de s'écarter de l'autre côté. (Lisez : ce qui *aide* « l'ancre à, etc.)

« Cet échapement a la propriété d'agir avec fort peu de force motrice, de n'être pas « *susceptible des changements* qui arrivent par la suite; ce qui fait qu'il est plus con- « stant que les autres à conserver sa justesse. L'aiguille des secondes reste fixe sur cha- « que division, ne la quittant que pour sauter sur une autre. Je crois cet échapement « préférable aux autres, tant pour sa solidité que pour sa simplicité. Cependant il faut « convenir qu'il a plus de frottement que celui à deux leviers, parce que les palettes « ne sont pas formées d'une *ligne de direction;* mais, comme ces sortes de Pendules « font peu de vibration, cette augmentation de frottement ne peut causer de variations « sensibles. »

1131. Dans cet article, il y a des observations justes, d'autres erronées, et plusieurs obscures (1); mais nous donnons exactement le texte et les figures de cet au-

(1) Les mots *s'enfonce beaucoup* pourraient occasionner une erreur, car, si les levées ont toute leur pénétration dans la denture, les repos n'y doivent pénétrer qu'infiniment peu. Il n'est pas exact de dire que l'échappement de *Graham* n'est pas susceptible des changements, etc., car l'agrandissement des trous le fait aisément *accrocher*, ce qui oblige aujourd'hui de garnir en rubis les trous des pivots de la roue, ceux de l'ancre et même les levées. Le *frottement* de l'ancre *à repos* de *Graham*,

teur : 1° pour ne pas risquer d'altérer, comme nous l'avons dit ailleurs, ce qui chez lui n'est déjà ni bien clair ni assez méthodique ; 2° pour n'en pas influencer l'interprétation, vu qu'il n'existe nulle part de déclaration authentique de la proportion spéciale des deux échappements de *Graham*, dont l'exécution postérieure a éprouvé beaucoup de *variantes* par cette incertitude. M. *Vulliamy*, Horloger du roi à Londres, qui s'est occupé d'en perfectionner l'ancre, dit avoir compulsé vainement les mémoires du temps, et notamment les *Transactions philosophiques* de la Société royale de Londres, dont *Graham* était un membre très-estimé, comme savant Horloger, et portant d'ailleurs une théorie lumineuse et une habile pratique dans plusieurs autres branches délicates de la mécanique (exemple utile que nous avons déjà signalé, mais inconnu dans nos temps modernes). Lorsque nous traiterons spécialement des meilleurs échappements à repos usités actuellement, ceux de *Graham* seront détaillés d'après d'autres autorités que celle de *Thiout*. Cependant nous ne devons pas oublier que cet ancien auteur rend justice en grande partie à l'artiste anglais, quoique ayant lui-même proposé d'autres constructions pour le même sujet, ainsi qu'on l'a déjà vu et qu'on va le voir ; impartialité qui prouve que le rapporteur était de bonne foi, et en même temps que l'ancre et le cylindre de *Graham* obtenaient déjà à cette époque les suffrages qu'il ont depuis justement conservés.

PLANCHE XXVII.

1132. *Thiout* va expliquer ici lui-même l'échappement suivant de sa composition :
« La figure 1 est un échappement que j'ai composé pour les grosses Horloges, celui qu'on « employe ordinairement (du temps de l'auteur) est fait avec une roue de rencontre. Quoi- « qu'il soit le plus naturel (lisez : le plus commun), il n'est cependant pas le meilleur « pour ces Horloges, parce que, le choc étant très-fort, l'échapement en est plutôt dé- « rangé par la nature des frottements qui tendent à l'éloigner de sa *direction;* les palettes « recevant ordinairement le choc des dents de la roue avant qu'elles arrivent au centre, « elles en sont plutôt creusées, parce que le choc d'un corps sur un plan oblique est plu- « tôt creusé que s'il se présentoit en ligne droite pour recevoir le même choc. On remar- « que que les trous des pivots de la rouë de rencontre se grandissent toujours du côté « qu'elle est poussée ; ce qui cause par la suite un arrêt inévitable.

« La rouë de rencontre frappant sur des leviers courts, le pendule acquiert de grandes « vibrations, qui sont sensiblement diminuées par l'irrégularité qui arrive au rouage par « l'épaississement de l'huile qui ôte la liberté des parties frottantes, etc. Un échapement « qui peut se faire sur de grands leviers diminue les vibrations ; elles en sont plus égales

supposé ici plus grand que celui des deux leviers *à recul*, est une contradiction, après l'aveu que le premier a la propriété d'agir avec fort peu de force motrice comparativement. Entendra qui pourra la *ligne de direction* renouvelée de l'article précédent (1105) tout entier de *Thiout*, ou cette expression n'est pas plus claire, etc. ; mais, dans ces échappements mal exposés, il serait superflu de relever toutes les inexactitudes et les obscurités des anciens auteurs. On s'est borné à indiquer les principaux inconvénients de ces premières inventions, excepté celle des GRAHAM et peu d'autres.

« et plus constantes. Il faut moins de force pour les entretenir. Les parties frottantes en « sont plus durables. Le pendule peut être plus long, la lentille plus pesante, et par ce « moyen les inégalités quelconques sont *bien* corrigées. (Lisez : *mieux* corrigées.)

« L'échapement à deux leviers a cette qualité ; mais son application n'est pas conve« nable pour des Horloges dont les frottements sont très-forts, les palettes ne pouvant « recevoir le choc qu'obliquement, elles se creusent aisément. »

1133. *Thiout* veut dire ici qu'avec l'échappement à deux leviers et à recul qu'il semble assimiler à celui de *rencontre* qu'on ne pratique plus en Pendule, les oscillations sont d'autant plus étendues que l'échappement est dit *plus près* ou *plus rapproché*, ce qui, en effet, a lieu avec des leviers courts, ainsi que le contraire avec des leviers plus longs. Mais, parmi certaines vérités que l'on commençait à sentir alors et que plusieurs de ces articles révèlent, nous devons prévenir l'erreur qui confondrait l'échappement à deux leviers ou palettes et à recul, avec celui à repos où de longs leviers ne doivent jamais être employés. La longueur variable des doubles leviers à recul est réglée, comme nous l'avons dit précédemment, par l'expérience de la longueur du pendule et du poids de la lentille. Le raccourcissement avantageux des leviers à repos est déterminé par une autre cause, la *juste* réduction de résistance avec assez d'arc de levée ; mais, sans examiner ici cette question, que nous traiterons ailleurs, nous remarquerons provisoirement que l'on s'attache aujourd'hui à raccourcir, beaucoup plus qu'anciennement, les bras de l'ancre à repos construit avec réflexion et d'après l'expérience du sujet (1).

1134. L'échappement à repos de *Thiout*, annoncé ci-dessus, fig. 1, pl. XXVII, est composé de la roue EE à doubles dents, et des deux leviers B et C ; l'effet en est facile à concevoir d'après l'ancre de *Graham*. L'auteur dit que, « l'impulsion s'y faisant *par une*

(1) Il est démontré que, dans la *réparation* ou *impulsion* sur les plans inclinés (ou levées) d'un échappement à repos, il y a la même puissance avec des leviers courts qu'avec de plus longs, vu le changement *obligé et proportionnel d'inclinaison* de ces levées, pour un même arc de *menée* et avec une même épaisseur des bras (celle-ci étant réglée par une même distance entre les dents de la roue dont on ne change point ici le diamètre) ; tandis que le *repos*, considéré à part, retarde d'autant plus les oscillations que les bras sont plus longs. Or, la longueur des leviers étant indifférente pour les levées, mais très-nuisible dans les repos, il y a en somme avantage à raccourcir les bras de l'ancre. Cette dernière proposition a été démontrée de nos jours avec la plus complète évidence géométrique et physique, à l'aide d'un instrument composé exprès par M. *Jean Wagner neveu*, rue *Montmartre*, qui l'a exposé avec succès et approbation parmi diverses autres machines d'épreuve, nouvelles, ingénieuses et bien raisonnées, dans plusieurs séances de la *Société chronométrique* de Paris, dont il est un des membres distingués. Son opinion était déjà celle de quelques autres membres, mais un instrument spécial la démontrait plus sensiblement. M. *Vulliamy*, de Londres, cité ci-dessus, a fait aussi des recherches et des travaux pour perfectionner en ce sens l'échappement à ancre et à repos ; ils ont été publiés et gravés dans le *Journal des Sciences, Lettres et Arts*, de Londres, en 1823. Nous donnerons les détails de ces diverses recherches des artistes modernes, lorsque nous traiterons spécialement ce sujet. Dans ces matières, les esprits justes et instruits s'accordent souvent à très-peu près dans les principes qu'ils ne se sont point communiqués : ce qui, comme l'observe le patriarche de la littérature française, serait une probabilité de plus, s'il y avait encore quelque doute ; mais la démonstration et l'expérience réunies lèvent toute incertitude. (*La réduction des bras de l'ancre a toutefois un terme proportionné.*)

« *partie droite*, le résultat en doit être plus durable, étant d'ailleurs d'une nature à ne « pouvoir se déranger par l'agrandissement des trous. La figure 2, même planche, est « encore le même échapement, avec un changement préférable, dit *Thiout*, par la faci- « lité et la simplicité du rochet qui donne par sa construction l'avantage d'avoir les dents « courtes, sans que les pointes des angles des bras puissent causer quelque inconvénient « lorsqu'on met le pendule en vibration. La forme des crochets de l'ancre, dont l'un est « plus bas que l'autre, est nécessaire pour que cette construction fasse échapement.

« La figure 3 est un échapement sur le principe des deux autres; mais sa disposition « n'est pas avantageuse pour la liberté de la vibration. » Nous n'ajouterons rien à cette juste observation, si ce n'est que cette figure 3 de *Thiout*, qui a servi de modèle à la nôtre, est très-inexacte. Les deux bras de l'ancre n'y sont pas assez écartés, et le plein des dents d'un côté devrait correspondre au vide des autres. Du reste, on vient de voir que le rapporteur convient lui-même que cette construction est défectueuse.

1135. Les deux autres constructions ci-dessus, fig. 1 et 2, ont évidemment leurs bras trop longs, et par suite trop de résistance sur les repos, suivant la note précédente. La grande pénétration entre les dents serait d'ailleurs un autre défaut analogue. Ces deux compositions de *Thiout* sont précédées d'une autre du même genre, mais dont les deux leviers détachés ont chacun leur tige et leurs pivots à part, et leur communication par rouleau, etc., à peu près comme dans les figures 9 et 10 de la planche XXV; ou la fig. 3, pl. XXVI, complication que l'auteur a abandonnée pour les deux dernières compositions à la suite, et qu'il était inutile de représenter ici.

1136. « La figure 4 est une rouë platte qui porte deux rangées de chevilles qui ren- « voyent alternativement de côté et d'autre la figure triangulaire. A est l'échapement qui « porte la fourchette. » B, au-dessous, est le profil de l'ancre. On conçoit de reste la dureté du recul de cette construction; elle est rapportée ici avec celle de *Vergo*, fig. 10, pl. XXVI, comme paraissant avoir été un acheminement à la suivante, où l'on a enfin pratiqué des repos.

1137. « La figure 5, continue *Thiout*, est un échapement à repos de M. *Amant*, qui « est composé d'une rouë platte, d'une rangée de chevilles et de l'arbre. La cheville quit- « tant la palette B, celle A reçoit le choc de l'échapement. La vibration augmentant, la « même palette A avance, retenant toujours la rouë, de sorte qu'elle est comme immo- « bile; ce qui fait que l'aiguille des secondes ne recule point. La vibration revenant, la « cheville oblige de faire écarter le crochet par le moyen du plan incliné; la cheville « échappant, elle tombe sur la partie droite (ou plutôt sur le repos concentrique) de « l'autre crochet où elle fait les mêmes effets. » Cette explication succincte de *Thiout* peut toujours laisser remarquer que la disposition d'*Amant*, où les leviers sont du moins plus courts (peut-être sans intention), paraît être la principale origine de tous les bons échappements à chevilles exécutés diversement depuis cette époque.

1138. « La figure 7 est, dit *Thiout*, une sorte d'échappement que je nomme circulaire, « puisque les deux pendules tournent toujours du même côté. La communication qu'ils « ont avec le rouage est par la cheville (vers AD) qui entre dans une ouverture faite au

« chaperon qui tient au pignon B. Les lettres DD sont deux ressorts qui aident les « pendules à s'écarter à peu près en raison de leur vitesse. Au milieu est la pointe du cône « sur quoi les deux pendules sont en équilibre. »

1139. Cette figure rappelle l'intention de celle n° 8 de la pl. XXV déjà mentionnée article (1108), sauf que le principal mobile, le pendule, est doublé ici, séparé du rouage, et soutenu en équilibre au centre de son plateau, sur la pointe d'un corps fixe et solide, de forme indifféremment conique, pyramidale ou prismatique. Ces figures ne sont que des imitations variées, mais incomplètes, du *Pendule parabolique* de *Huyghens*, établi suivant le principe de la force centrifuge, qu'il trouva le premier, et que nous expliquerons à notre article du *Pendule*.

1139 *bis*. « La figure 8, dit *Thiout*, est une manière de suspendre un pendule pour les se- « condes, qui entretient longtemps ses vibrations tendant à leur donner plus d'égalité, et « peut être réglé sans les interrompre, par M. *Regnauld*.

« AB figure 8 représente de plat deux pièces dont les sommets sont les *cordes* de deux « portions de cercle soutenus par deux rayons chacun. Celle A est faite en forme de four- « chette, ainsi que la figure C la représente de profil, et soutient le pendule par la che- « ville C, figure 9. L'autre pièce B est telle qu'on la voit dans le profil en F. En passant « dans la fente LD faite aux côtés de la pièce 9 qui est la partie supérieure de la verge « d'un pendule qui bat les secondes, on a taraudé en vis la partie qui excède le point de « suspension pour faire monter et descendre, suivant le besoin, une petite lentille ou « régulateur percée et taraudée dans son épaisseur, afin de pouvoir, par son moyen, « achever de régler la Pendule. On peut le faire monter et descendre en le tournant par « les dents indiquées en E, figure 8, et toujours parallèlement à la cheville C, figure 9. « Sans interrompre ses vibrations, il est clair, par la figure 8, que ce pendule, une « fois mis en mouvement, l'entretient très-longtemps, puisqu'alors la cheville C figure 9 « qui le porte ne souffre aucun frottement, et qu'ils sont reportés sur les pivots (du bas) « des profils C et F, qui, étant un peu au large dans les trous de la barre de fer qui « les porte, que l'on a jugé inutile de représenter ici, roulent dedans sans se frotter par « le peu de mouvement qu'ils ont à faire ; par conséquent la Pendule peut aller avec « moins de poids.

« Cette façon de suspendre un pendule a une autre propriété. C'est qu'étant en repos, « ces pivots C de la figure 9 sont placés justement, figure 8, au milieu de la *corde* qui « les soutient, et dans cet endroit le plus près du centre doivent être décrits les arcs. Si « on met le pendule en mouvement, les pivots C font en roulant couler sous eux les « deux *cordes*, et, en quittant le point de la perpendiculaire au centre, sont forcés de « monter, entraînant avec eux le pendule et la lentille. On doit inférer de là qu'il faut « pour cet effet une quantité de force pour faire monter jusqu'à un certain point, et que « pour aller plus loin il en faudroit encore davantage : on veut dire par là que si le « pendule étoit à l'ordinaire et que la lentille, par l'impulsion de la fourchette, se fût « éloigné de deux pouces de la ligne de direction avec une force double, elle pourroit « aller jusqu'à quatre en supposant une flexibilité parfaite au ressort supérieur, puisque

« cet éloignement n'est autre chose qu'un levier. Cela n'arriveroit point dans celle-ci, « puisque l'excès de force qui pourroit faire décrire à la lentille une portion de cercle « plus grande est employée à la faire monter; par conséquent les vibrations tendent à un « isochronisme plus parfait. »

1140. Nous souhaiterions qu'à l'aide des figures 8 et 9, et de leur développement à part en G et F, le lecteur pût entendre le fatras indigeste qui précède, et qu'obscurcissent à la fois les liaisons inconvenantes des idées et les fautes de grammaire, de ponctuation et d'orthographe, etc. Nous nous bornerons à faire remarquer que si les *cordes* de ces portions de rouleau peuvent en effet corriger le retard du pendule par les grands arcs, l'effort pour soulever le pendule exige aussi une grande augmentation dans la force motrice; que d'ailleurs l'usage des rouleaux, aux suspensions comme aux échappements, a toujours été trouvé défectueux, à la longue, par leur adhérence variable, même à sec, dans les pressions délicates, comme aussi par l'encochement et la destruction auxquels ils sont sujets sous de fortes pressions; en sorte que la construction vantée ici par *Thiout*, bien que connue, ne fut pas imitée, et qu'on lui a constamment préféré la suspension par deux ressorts, ainsi que nous le dirons ailleurs. Du reste, cet article-ci traite de la suspension du *pendule* et non d'échappement. On trouvera plus loin les conditions importantes d'une bonne *suspension*.

1141. La figure 10 est, suivant *Thiout*, la « construction d'un pendule pour avoir des « vibrations d'un temps égal aux Pendules à ressort. Cette invention du sieur *Regnault* « consiste à faire le pendule de deux pièces; la partie inférieure A C est portée par un « ressort plié en forme d'hélisse, et l'autre partie B à l'ordinaire. On peut enfermer le « tout à l'endroit où la fourchette l'embrasse (dans la *passe*), comme on le voit repré- « senté » (à découvert, pour en mieux indiquer l'effet voulu): « Voici, ajoute *Thiout*, ce « que l'auteur *rapporte* sur cette invention :

« — « On sait que les corps mus en rond tendent à s'éloigner du centre de leurs mou- « vements, à proportion de la force qu'ils reçoivent; d'où il suit que la lentille de ce « pendule s'allonge en raison de l'action qui la fait vibrer, et forme des vibrations d'une « durée égale, par ce plus ou moins d'allongement. Toute la difficulté dans l'exécution « est de donner une pesanteur à la lentille proportionnée à la force du ressort. Voici une « *méchanique* dont on peut se servir.

« Il faut placer une petite Pendule à poids près d'une autre à secondes, y suspendre le « pendule qu'on veut examiner, et, après l'avoir mis en mouvement, compter combien il « fait de vibrations pendant que celui des secondes en fait 100; ensuite char- « ger la petite Pendule d'un poids double de celui qui y étoit, et s'il arrive que « le même nombre de vibrations du petit pendule réponde encore à 100 de celui des « secondes, le poids de la lentille est environ de la force du ressort (dans la *passe*). S'il « en fait plus, il faut mettre dans la lentille quelques grains de plomb; s'il en fait « moins, en ôter et répéter les observations jusqu'à ce que l'on ait trouvé un parfait « rapport de nombre de battements entre les deux pendules avec le poids simple « et double.

« C'est par les inégalités des vibrations surtout dans les Pendules à ressort que le sieur « *Regnauld*, Horloger à Chaalon, a imaginé ce moyen qu'il substitue à la place de la « cycloïde qu'il prétend ne valoir que lorsque l'on voudroit faire marcher également « deux Pendules de même calibre et de même nombre, et les Pendules de même lon- « gueur ; c'est le cas où il trouve la propriété de la cycloïde qui donneroit à la vibration « de l'une à l'égard de l'autre une durée égale qui, sans elle, seroit détruit par un en- « grenage plus ou moins fort des palettes à une Pendule qu'à l'autre ; mais comme on « avoit dessein de procurer au même pendule une justesse parfaite dans les grandes et « petites vibrations, en se servant de la cycloïde, le peu de fruit qu'on en a retiré l'a fait « abandonner tout à fait. » — »

1142. On voit ici que ces observations du sieur *Regnauld* de Chaalons, qui ne manquait pas d'idées, n'étaient pas au fond plus solides ni plus claires que celles de son rapporteur *Thiout* ; du reste, le frottement et le jeu inévitables de l'assemblage proposé ci-dessus dans la *passe* formerait un très-mauvais pendule, quand même le principe en serait applicable. Si le pendule semble ici devoir se raccourcir dans les grands arcs, c'est seulement par comparaison, et parce qu'il s'allonge en passant à la verticale, où sa vitesse et sa force centrifuge sont plus grandes qu'aux extrémités des arcs ; mais ce ressort, affaibli par la chaleur et plus rigide par le froid, n'obéirait pas également dans toutes les températures, etc. En définitive, cette idée assez ingénieuse ne peut être adoptée, par la raison que les frottements, les ballottements, les rouleaux, ne conviennent ni aux échappements, ni aux suspensions, ni aux pendules. Ces parties essentielles pour la mesure du temps sont excessivement exigeantes et susceptibles ; mais, à tout examiner, les diverses parties de l'Horlogerie sont à peu près dans le même cas ; aussi n'est-il pas d'art qui habitue davantage à la précision.

1143. « Dans la figure 12 A A, dit *Thiout*, sont deux rouleaux d'une forme lenticulaire « portés par les branches AB qui est une espèce d'ancre de deux pièces, lesquelles se « fixent ensemble par le moyen des poids (lisez pieds) et d'une vis, comme on le voit à « droite au profil CB. Il y a dans la tête de la pièce vue de face un trou quarré G, dans « lequel passe une verge de balancier à l'ordinaire. La figure 13 est une tige sur laquelle « est enarbré obliquement le cercle H, de façon que l'espace B C est moitié de l'arc que « doit décrire la lentille. Lorsque le cercle H tourne entre les rouleaux A A en les tou- « chant alternativement au point le plus resserré au-dessus de D, c'est-à-dire sur la ligne « de leurs centres, il les force d'aller tantôt d'un côté, tantôt de l'autre ; et comme les « bouts de l'ancre (les bords des rouleaux) roulent sur le cercle oblique, les frottements « sont reportés sur leurs pivots qui sont très-minces. L'arbre qui porte le plan H « figure 13 doit couper à angle droit la verge du balancier, et être placé à la hauteur et « vis-à-vis les pivots des rouleaux qui tombent perpendiculairement dessus.

« Il faut observer, dit M. *Reynauld*, que le pendule appliqué à cette machine employe « deux secondes par vibration, *afin de gagner du temps* ; c'est ce qu'il a pratiqué dans « celui qu'il a construit, et qui fait son effet *à merveille*. »

1144. Nous appliquerons également à cette composition ce que nous avons dit des deux

précédentes, et, quant au succès *merveilleux* annoncé ici, on a l'expérience qu'une foule d'inventions de ce genre paraissent réussir souvent pendant les premiers mois, une année même, et finissent par développer des inégalités ou défauts quelconques qui les font à la fin rejeter. Outre les objections du raisonnement et de l'expérience, l'abandon général de la plupart de toutes ces conceptions établit déjà contre elles une opinion assez défavorable, et cette construction-ci est une des plus défectueuses.

1145. La figure 14 ne concerne point les échappements, mais seulement la première ébauche d'un *ressort réglant* appliqué au balancier de la Montre. Ce ressort ondé, fixé d'un bout au piton de la platine et de l'autre à l'une des barettes ou rayons du balancier, n'aurait pas permis de grands arcs de vibration ; il fut heureux que *Huyghens* s'emparât de cette ébauche grossière pour la perfectionner en lui faisant prendre la forme spirale, la plus convenable pour la liberté des grands arcs, pour l'isochronisme, etc., forme qui a été scrupuleusement conservée depuis. Nous traiterons du spiral à l'article des échappements perfectionnés dans les Montres, et nous parlerons du principe de l'équilibre forcé de deux spiraux, proposé par le savant *Bernouilly*, et cité par *Thiout*.

1146. Nous avons réservé pour dernière explication de cette pl. XXVII, et comme étrangère aux échappements, la figure 2, qui concerne une première ébauche de compensation des effets de la température sur le pendule. Quant aux anciens échappements, nous n'avons pas jugé utile de donner tous ceux de *Thiout* et d'autres auteurs nationaux et étrangers, qui ne sont que des *variantes* des échappements déjà cités, ou sont évidemment défectueux, ou bien d'une complication vicieuse. Les exemples rapportés ici, la plupart sans succès, et abandonnés, sont un avis suffisant de la difficulté du genre. Les échelles à virgule et ceux à chevilles seront traités dans un autre chapitre.

1147. La figure 2 est donc, suivant *Thiout*, une « composition pour corriger l'erreur « causée par la dilatation de la verge d'un pendule qui bat les secondes par la dilatation « même. Cette méthode me fut, dit-il, communiquée dans une lettre par le sieur *Re-* « *gnauld*, Horloger à Chaalons. Quelques mois après l'avoir reçûë, M. de *Mairan*, m'ayant « demandé de lui faire quelques Pendules pour les astronomes de Saint-Petesbourg, me « proposa d'y ajouter une contre-verge semblable à celle dont il s'agit ; et sur ce que je « lui dis que j'en avois connoissance, il me fit voir le dessein qu'il avoit fait là-dessus « dans ses manuscrits, à l'occasion d'une idée du sieur *Graham* qui était insérée dans les « *Transactions philosophiques* de 1728. Cette idée consiste à remplir la lentille jusqu'à « environ moitié de *Mercure ;* mais cette construction n'ayant pas assez de rapport au « fait dont il s'agit, elle donna occasion à M. de *Mairan* d'imaginer une contre-verge à « peu près telle que le sieur *Regnauld* l'a décrit ci-après. Ce n'est pas la première fois « que d'habiles gens se sont rencontrés dans la même idée.

« Le plan verticical AE est un mur dans lequel est scellée une barre de fer G au point « E vis-à-vis le centre d'oscillation H. Cette barre de fer porte par son bout supérieur la « verge du pendule à l'endroit G. Le ressort F suspenseur de la verge du pendule passe « entre deux lames d'acier jointes ensemble dans la tête du cocq B qui déterminent le « centre du mouvement. Il est aisé de voir que lorsque le pendule allonge par la dilata-

« tion, la barre qui fait le même effet élève le pendule de la même quantité. On trouvera « dans la suite différentes idées sur ce sujet. »

1148. Il paraîtrait ici que c'est une des premières tentatives incomplètes pour la correction des effets de la température, sauf celle de *Graham* par le *Mercure;* mais l'idée de MM. *Regnauld* et de *Mairan* était très-imparfaite. Les murs, considérés à tort comme à l'abri des effets de la température, en sont néanmoins susceptibles à un certain degré, malgré leur poids, et ne conservent pas des dimensions fixes ; ce moyen ne peut donc diminuer qu'en partie l'allongement du pendule, mais il y a ici plusieurs autres inconvénients : le glissement obligé de la barre de fer dans son piton fixé au mur vers G est beaucoup trop dur, par l'effet du tirage oblique ; et quand on y remédierait, il resterait bien d'autres imperfections ; on conçoit en effet que le ressort de suspension, changeant de hauteur, présente entre les lames du coq des points inégalement élastiques par la variété inévitable de la trempe ; ces points n'y sont pas également libres, et l'on sait que les *deux* ressorts de suspension (car on les préfère doubles aujourd'hui) doivent être très-serrés, au moins dans la mâchoire du haut. Les tiges des compensations ne doivent pas être coudées, et celle-ci l'est en deux endroits, dont celui du haut, qui porte le pendule en *porte-à-faux*, produit une flexion de la tige vers le mur, défaut qui, dans tous les cas, doit être scrupuleusement évité. La tige compensatrice doit être de même grosseur que celle du pendule, pour être saisie aussi promptement que lui par les changements de l'atmosphère, etc. Au total, cette construction ne serait qu'un faible palliatif. Il faut des dispositions bien autrement rigoureuses pour établir une vraie compensation, et *Thiout*, ainsi que M. de *Mairan*, n'auraient pas dû la comparer à la méthode par le mercure, encore estimée aujourd'hui et adoptée judicieusement par *Graham*, dont les idées généralement justes et savantes étaient plus profondément méditées. Nous reviendrons ailleurs sur ce sujet, et d'après des expériences plus complètes et plus authentiques. Du reste, *Thiout* n'a pas indiqué dans sa figure le chevalet solidement scellé au mur, pour porter le mouvement, mais cette partie accessoire doit être sous-entendue, et le lecteur peut aisément la suppléer.

1149. La figure 1, pl. XXVIII, est un des premiers échappements que *Berthoud* avait destinés à ses Montres marines ou à longitudes ; mais il n'avait pas encore en ce genre l'expérience qu'il acquit plus tard. Nous allons le laisser s'expliquer lui-même sur cette matière bien autrement difficile et exigeante ici que pour l'usage civil.

« Nous imaginons, dit *F. Berthoud*, que si l'on vouloit faire une Montre la plus par- « faite possible et propre à mesurer le temps sur mer, on y parviendroit en faisant un « *échappement isochrone*. Cet échappement ne seroit pas porté par l'axe même du balan- « cier ; l'axe de l'échappement porteroit un rateau denté, dont les dents engreneroient « dans un pignon porté par l'axe du balancier : de cette manière le balancier parcourroit « de grands arcs et l'échappement de forts petits. Les arcs de levée feroient parcourir de « grands arcs au balancier, et les arcs de supplément seroient fort petits. En voici le « méchanisme (on voit qu'il ne pensait pas encore à l'échappement *libre*) :

« A est la roue d'échappement. B l'ancre portant des plans inclinés ou courbes pro-

« pres à obtenir l'isochronisme des oscillations; CD le balancier, *a* le pignon dont l'axe « porte le balancier; *b* est le rateau qui engrène dans ce pignon: ce rateau est porté par « l'axe d'échappement.» (*Ec est un contre-poids placé au bout du bras c pour maintenir l'ancre en équilibre.*) *Berthoud* borne là sa description, et il faut convenir que si elle n'est pas complète, elle est du moins suffisante pour le peu de succès qu'elle promet. L'auteur compte ici sur des courbes isochrones, et renvoie même à son *ancre isochrone* décrit dans son *essai*, et dont nous avons donné la figure 10 dans notre pl. IV, citée provisoirement art. 70 (nous n'en parlerons pas ici, mais plus loin, parmi les pièces à l'usage civil); nous verrons plus bas qu'il rejette lui-même ce mode comme insuffisant, en appuyant sur l'impropriété de l'échappement pour produire l'isochronisme, qu'il n'attend que du spiral et du balancier compensés. Il emploie ici un engrenage sur l'axe du balancier, dont le frottement de va-et-vient est continu, tandis qu'ailleurs il rejette autant que possible presque tout frottement dans l'échappement. (*V.* page 97 de notre introduction). Mais les contradictions de *Berthoud* sont si nombreuses dans les 8 vol. in-4° qu'il a publiés, qu'en ne comptant pas celles-ci, il y en restera toujours beaucoup trop. Le pignon au centre de son balancier ne porte ici que six ailes: c'est le plus mauvais des engrenages; mais il faut plutôt l'imputer au graveur gêné par la réduction de la figure; ce qui prouve qu'il ne faut jamais prendre les nombres ni les mesures uniquement sur les planches, et qu'il vaut mieux ne s'en rapporter qu'au texte, comme nous l'avons dit assez souvent. Les échappements libres ci-après ne sont encore que l'ébauche du genre, et termineront cette série d'anciens échappements délaissés, mais qui indiquent utilement la marche des idées et les erreurs successives qu'il est nécessaire d'éviter. On a recherché avec raison, dans les suivants, la liberté et l'indépendance du modérateur, après qu'il a reçu l'impulsion ou réparation de l'échappement; mais on n'a atteint le but que dans des essais postérieurs, qui ont enfin produit les échappements libres actuels.

1150. « Jusque vers l'année 1754, dit *Berthoud*, les échappements dont on faisoit « usage étoient d'une précision suffisante pour la mesure du temps dans l'usage civil: « mais lorsque des artistes à cette époque s'occupèrent de la composition d'Horloges pro- « pres à déterminer la longitude en mer, il devint nécessaire d'établir de nouveaux prin- « cipes et une théorie fondée sur les loix de la méchanique et du mouvement, et d'assi- « gner à chaque partie du méchanisme d'une Horloge les fonctions que la théorie « indiquoit. C'est d'après une étude plus profonde et une analyse plus subtile de toutes les « parties qui doivent composer une Horloge marine, que ces auteurs reconnurent que la « justesse de ces machines ne pouvoit avoir lieu que dans le balancier et son ressort spiral, « que c'étoit de ce régulateur seul (le *spiral*) que l'isochronisme des oscillations d'inégale « étendue devoit naître, et que dès lors les fonctions de l'échap. ne consistoient nulle- « ment à procurer cet isochronisme, mais seulement à entretenir le mouv. du régul. (1),

(1) Nous devons prévenir que *Berthoud* appelle souvent *régulateur*, dans la Montre, le balancier que nous nommons *modérateur*, en réservant le nom de *régulateur* au spiral. Souvent aussi il donne le nom de régulateur aux deux parties réunies; le sujet, du reste, explique assez par lui-même la partie ou la réunion que l'auteur a en vue. Le pendule seul est à la fois *modérateur* et *régulateur*.

sans troubler son isochronisme. On reconnut aussi dès lors que le régulateur étant dépouillé de tous les frottements qui auroient pu troubler son isochronisme, l'Horloge à laquelle ce régulateur seroit appliqué éprouveroit des variations très-considérables en passant du chaud au froid, parceque alors l'élasticité du ressort spiral (et le *diamètre du balancier*) changeroit en raison de ces différences de température; et dès lors on inventa les moyens de correction propres à compenser ces effets de la température. Tels sont les premiers principes établis par les auteurs de la découverte des Horloges à longitude. L'échappement fut donc dès lors considéré sous une nouvelle face.

1151. « Nous ne devons pas omettre ici, continue *Berthoud*, que cette nouvelle théorie de l'isochronisme des oscillations du balancier par le spiral appartient en entier aux artistes françois : cela est si vrai que *Harrison* dans sa Montre marine a cherché à obtenir l'isochronisme par l'échappement, tant il est difficile de secouer le joug des vieilles erreurs (1) !

1152. « L'office de l'échappement et les conditions qu'on exige, d'après cette nouvelle théorie, sont : 1° que la force du moteur soit transmise sans perte au régulateur au moyen de l'échappement, c'est-à-dire que la roue d'échappement communique au régulateur la force qu'elle reçoit du moteur avec le moins de frottement possible (*dans les fonctions de l'échappement*); 2° qu'après que la roue a communiqué l'impulsion au régulateurs celui-ci achève librement sa vibration; 3° que l'échappement n'exige point d'huile, en sorte que les frottements qu'il éprouve soient les plus petits possible, et que par conséquent les variations qui pourroient survenir dans ces frottements ne soient jamais capables d'affecter la marche de l'Horloge ou d'altérer l'isochronisme de ses oscillations. Telles sont les propriétés que je désirois obtenir d'un échappement, lorsque j'ai traité de la théorie des Horloges marines : ces propriétés se trouvent heureusement réunies dans l'échappement à vibrations libres (*à cercle et détente ressort*) dont nous allons donner une notion. » (Cette description va se trouver un peu plus loin.)

1153. « M. *Pierre Le Roy* célèbre artiste (l'*aîné des quatre fils de Julien*), auquel on doit la construction d'une excellente Montre marine, a aussi inventé un échappement libre qui a parfaitement réussi (2)... L'invention de l'échappement à vibrations libres paroît appartenir également à plusieurs artistes qui, sans connoître ce que chacun avoit pensé, ont eu à peu près les mêmes idées. Ces artistes sont MM. *Le Roy*, *Thomas Mudge*, artiste anglois, et *Ferd. Berthoud* : mais les combinaisons qu'ils ont employée

(1) Nous copions dans le volume de *Berthoud* jusqu'à son orthographe vieillie, malgré le luxe de cette belle édition de 1802, l'un des derniers ouvrages de *Berthoud*, et sorti des presses de la République, qui formaient précédemment l'Imprimerie royale. On aurait pu faire à cet établissement un reproche plus fondé sur le *joug des vieilles erreurs* que celui adressé ici à *Harrison*, car l'orthographe française était améliorée depuis longtemps; il n'en était pas de même des travaux pour la mesure exacte du temps en mer, qui se perfectionna lentement, avec peine et dépense, et ne faisait alors que de naître; *Berthoud* a mérité lui-même plus d'une fois le reproche qu'il fait ici mal à propos.

(2) *Pierre Leroy* découvrit l'isochronisme du *ressort spiral*, et *F. Berthoud* en publia l'explication géométrique; ces deux auteurs se disputèrent longtemps la découverte de l'isochronisme de ce ressort.

« sont assez différentes les unes des autres pour qu'on ne puisse douter que chacun d'eux « est véritablement inventeur du méchanisme qu'il a employé... Les artistes dont nous « venons de parler ne sont pas les seuls qui aient eu le projet d'un échappement libre ; « car longtemps avant eux, *Jean-Baptiste Dutertre* avait eu l'idée d'un tel méchanisme; « mais comme cet échappement ne nous est pas connu, et qu'il n'a jamais été publié, « nous ne pouvons en parler. »

Ce que nous venons de rapporter d'après *Berthoud* sur les premiers essais d'échappements libres suffira pour saisir l'intention qui a dirigé les échappements qui nous restent à expliquer pour terminer cette revue. On sait que ce ne sont point encore des modèles à suivre, mais seulement les premiers pas qui ont amené les dernières constructions adoptées aujourd'hui, et que nous donnerons à part dans un autre chapitre avec les développements et la précision nécessaires à leur parfaite exécution.

1154. La figure 2, pl. XXVIII, est ce premier échappement libre de *Berthoud*, annoncé ci-dessus, représenté en perspective, et qu'il décrit comme il suit : « A représente l'axe « du balancier (*supprimé dans la figure*), sur lequel est fixé par deux vis le cercle B d'é« chapement (*moyennant une assiette* portée en dessous par l'axe). C est la roue d'écha« pement ; *a b c* la détente, laquelle porte en *b* un talon formé en portion de cercle qui « sert à suspendre l'action de la roue C, pendant que le balancier va et revient sur lui« même ; la partie *a b* de la détente est formée en ressort très flexible, surtout à l'extré« mité *a* qui est censée être le centre du mouvement de la détente que j'appelle *détente-* « *ressort* (cette partie *a b* du ressort devroit avoir dans la figure deux fois plus de longueur « pour être plus flexible); la partie *bc* forme la détente, dont *a* est le centre du mouve« ment. Le ressort *d l e*, fixé par une vis et un tenon sur le cercle d'échappement, porte « en *d* une cheville, laquelle, agissant sur le bras *c* de la détente, dégage la roue lorsque « le balancier tourne de B vers A ; c'est en ce moment qu'une dent de la roue agit sur la « tranche *h* du cercle B, et qu'elle lui transmet son action » (l'*entaille* du cercle, se trouvant au-dessous du ressort *l* et de la détente-ressort, ne peut-être bien vue ; elle semble même indiquée dans un sens opposé dans la planche de *Berthoud*, car cette entaille, comparable à celle d'une dent de rochet, doit présenter sa face butante en opposition au mouvement de la dent de la roue). « Le cercle et le balancier continuent de tourner libre« ment : revenant ensuite sur lui-même, la cheville *d* du ressort *d e* glisse sur le bout « incliné *c* de la détente, et se remet en prise ; en sorte que le balancier ayant achevé la « seconde vibration, à son retour la cheville *d* élève de nouveau la détente et dégage la « roue. J'appelle *levée-ressort* la pièce *d, l, e ;* la partie *d e* forme le ressort qui doit être « très-flexible, surtout en *e* qui est le centre de mouvement de la cheville *d ;* la levée« ressort peut fléchir vers le centre de l'axe A, mais elle ne peut trop s'engager avec le « bras de la détente, sa course de ce côté étant bornée par une cheville portée par le cer« cle B. La course de la détente est également bornée par une cheville ou par une en« taille dans la platine. »

« La figure 3, à gauche de la précédente, représente le plan de cet échappement ; B est « le cercle d'échappement ; *a b c* la détente-ressort; *d l e f* la levée-ressort. »

1155. « La figure 4 aussi en perspective représente, dit *Berthoud*, la construction « d'un autre échappement libre dans lequel on a supprimé les ressorts, lesquels sont « suppléés comme on va l'expliquer. L'action de la roue d'échappement A est transmise « au balancier de la même manière que dans l'échappement libre décrit ci-devant, c'est- « à-dire qu'elle agit sur l'entaille du cercle B porté par l'axe du balancier. La figure fait « voir l'échappement au moment où la détente a dégagé la roue d'échappement pour agir « sur l'entaille.

« La détente C (*espèce d'ancre*) porte deux bras d'arrêt ou talons *a* et *b* dont les faces « sont figurées *en portion de cercle* : le talon *a* sert à suspendre l'action de la roue après « qu'elle a communiqué son action à l'entaille *e* du cercle B. Le talon *b* reçoit la dent de « la roue, lorsque le balancier, en rétrogradant, fait échapper celle qui repose sur le « talon *a*. Ces effets sont produits par les deux leviers C, *d*, C, *c* formant la fourchette « qui fait mouvoir la détente C (l'ancre) ; cette fourchette est fixée sur le centre C de la « détente. Ces leviers sont placés l'un au-dessus de l'autre. Le levier C*d*, qui est le plus « près de la détente, correspond à un demi-cercle *d e* placé *immediattement* au-dessus du « cercle d'échappement B ; ce demi-cercle est entaillé et présente un plan droit dirigé à « son centre : le plan droit de ce demi-cercle opère le dégagement de la roue par son « action sur le bras C*d* (lorsque le balancier rétrograde après sa 1re vibration) ; pendant « cet effet, la roue n'avance que d'une petite quantité, suffisante pour dégager le talon *a*, « et laisser rétrograder le balancier (pour prépar.).

« Le balancier, ayant achevé cette 2e vibration, revient sur lui-même ; et le demi-cer- « cle de levée *f g* placé au-dessus du 1er présente son plan droit *f* au levier supérieur *f e* « de la fourchette ; celui-ci est entraîné, et fait écarter le talon *b* de la détente, qui ar- « rêtoit la roue : en ce moment une dent de cette roue va agir sur l'entaille *e* du cercle « d'échappement; ce qui produit une nouvelle impulsion, qui est transmise au balancier; « et ainsi de suite. (L'effet en *a* est la préparation, *b* procure seul l'impulsion.)

« Les portions de cercle *d e* et *f g* formées par les levées d'échappement servent à main- « tenir alternativement les bras C*d* et C*e* de la fourchette dans une position fixe, qui as- « sure les effets de l'échappement. » (Il ne répare que dans une vibration sur deux.)

1156. De ces deux échappements de *Berthoud*, c'est celui de la figure 2 dont l'esprit se retrouve le plus dans les constructions actuelles, sauf quelques dispositions et formes des parties que l'on a changées pour éviter l'adhérence des points de contact, multipliés par les chevilles qui en bornent les effets. Aujourd'hui le ressort-détente est bien à très-peu près le même; mais il porte à son extrémité, vers l'axe, un petit ressort extrêmement faible du pied, dont la fonction remplace celle dite *pied-de-biche* dans le retour muet du balancier ; et l'on a supprimé la levée-ressort ci-dessus, ainsi que nous le dirons ailleurs lors de la description exacte et rigoureuse de l'échappement libre actuel à cercle et à détente, et des autres de ce genre.

1157. Quant à l'échappement de la figure 4, rien n'y garantit les leviers de frotter contre les portions saillantes de cercle, puisque les talons retenant la roue sont formés de courbes concentriques à leur centre du mouvement, ainsi que l'auteur le dit. On n'y

trouve point non plus l'équilibre de l'ancre ou détente pour une autre situation que celle horizontale. Dans les échappements libres à ancre d'aujourd'hui, les repos, au lieu d'être concentriques, ont une légère pente en arrière, qu'on nomme *tirage*, afin que la roue tende plus à attirer à elle les talons qu'à les faire reculer, ce qui maintient plus sûrement les bouts de la fourchette un peu éloignés des portions saillantes de cercle qui sont au-dessus du cercle d'échappement, etc., ainsi que nous l'expliquerons en son lieu.

1158. La figure 5 représente un autre échappement libre à détente et à ressorts que *Berthoud* appliqua à son Horloge marine nº 9. « Cette figure, dit l'auteur, représente l'é-« chappement vu en plan. A est le cercle d'échappement, C la roue, *db* la détente; le bras « haut de la détente suspend la force de la roue pendant que le balancier oscille librement : « le ressort *d* sert à ramener cette détente aussitôt que la palette *c* a achevé d'écarter le « bras *b*; c'est en ce moment qu'une dent de la roue va agir sur le rouleau *k*, porté par le « cercle d'échap. A, et transmet sa force pour entretenir le mouvement du balancier : celui-« ci, ayant achevé son oscillation, revient sur lui-même, et, en rétrogradant, la palette *c* « rencontre le bout *b* de la détente; mais elle cède en s'écartant de ce bras (*qui la repousse*); « le ressort *l* la ramène pour la remettre en prise, lorsque le balancier a achevé son oscil-« lation; en sorte qu'en revenant cette palette *c* se présente de nouveau au bras de la « détente pour dégager la roue, et restituer de nouveau l'impulsion au balancier (1). »

1159. La figure 6 est encore un des premiers échappements libres, celui à deux arrêts sans ressort de *Robert Robin*, habile Horloger français; les fonctions de l'échappement sont répétées trois fois autour de la roue pour en présenter l'effet sous divers aspects, dit *Berthoud*, qui va continuer ici (*Berthoud* aurait dû le citer aussi parmi les premiers inventeurs) :

« A est la roue d'échappement, G la détente (ou ancre). Dans cet échappement, la roue ne « restitue la force perdue par le balancier que de deux en deux vibrations. La détente G « porte deux talons d'arrêt *ab*, qui forment avec la roue un premier échappement. Un « de ces talons *a* étant écarté (figure de gauche de la détente), la roue A échappe et agit « sur l'entaille *c* du cercle B, et restitue la force au balancier sur l'axe duquel le cercle B « est supposé fixé (*le balancier n'est pas représenté*). Le talon *b* reçoit la dent de la roue « pour l'arrêter, et le balancier (*ou le cercle*) achève sa vibration : à son retour, il fait « dégager la palette *b*, et la roue parcourt un très-petit espace et va tomber sur le ta-« lon *a*. Cet effet sert donc, comme nous l'avons déjà expliqué ailleurs, au mouvement « rétrograde du balancier. Voici donc en quoi cet échappement diffère de ceux que nous « avons décrits; c'est par la manière dont la détente correspond au balancier. Ici, l'axe

(1) *Berthoud* n'a employé cet échappement qu'une seule fois; c'est à très-peu près celui de son habile et ingénieux rival, *P. Leroy*, qui l'appliqua, non au cercle d'échappement, mais au *limbe* (bord ou zone) de son bal. du diamètre de 4 pouces et pesant 5 onces. Les épreuves des Horloges marines et les autres recherches de *P. Leroy* lui méritèrent deux prix doubles; mais l'appui de M. *de Fleurieu* paraît avoir prévalu, en faveur de *Berthoud*, sur celui de M. *de Courtanvaux*, amateur généreux et zélé des arts, qui avait fait équiper à ses frais une frégate pour éprouver les pièces de *P. Leroy*. L'on doit regretter la cessation de ces travaux en ce genre et de tels encouragements, dont nous donnerons ailleurs une notice intéressante.

« du balancier porte la dent *d* et la détente G la fourchette *e*; à chaque vibration, la « dent vient s'engager dans la fourchette, et par conséquent fait aller et revenir ses ta- « lons pour laisser échapper successivement les dents de la roue. Pour assurer cet effet, « l'auteur a attaché un second bras *f* à la détente; ce bras, lorsque la dent agit sur la « fourchette, s'engage dans une entaille faite (*en hauteur*) au canon qui porte la dent, « et en dessous d'elle; la fourchette étant dégagée de la dent, ce bras *f* est retenu près « de la circonférence de la virole; ce qui maintient la détente dans une position fixe. « Par cette disposition de la fourchette et de la dent, il suit que le balancier peut faire « près de deux tours à chaque vibration, ainsi qu'il y a lieu dans les échappements libres « à détente et à ressort. » (La languette doit s'arrondir en *f*.)

1160. Il nous semble que cette exposition par *Berthoud* de l'échappement de *Robin*, qui a fait époque en son temps, est inexacte à son début, et peu claire du reste. Nous y ajouterons que cet échappement est de ceux que l'on appelle boiteux, en ce que la roue y a ses mouvements alternatifs, inégaux, une grande et une petite chute, provenant de la différence de longueur et de l'ouverture des bras de l'ancre, que *Berthoud* appelle *détente*. L'un des bras, en effet, n'a de longueur qu'environ une dent et 1/5e du vide entre deux pointes de dents, et l'autre bras a une dent et 3/5es; les deux talons embrasseraient en tout deux dents et 4/5es. Lorsque le bras *a* est dégagé, celui *b* rentre un peu en avant de la dent K, mais seulement d'un cinquième du vide (il devait rester un cinquième de vide entre la dent K et le talon du bras *b*, trop long dans la gravure); il s'ensuit que la dent K et aussi celle A ne peuvent avancer que de ce cinquième; mais cela suffit pour que la dent A se trouve seulement un peu au delà du talon *a*, sans pouvoir toucher encore au cercle d'échappement (c'est ce que l'on peut appeler la *préparation*), afin que ce talon *a* puisse, dans le retour du balancier, rentrer derrière la dent *a* sans y toucher, vu que le bec du talon *a* est assez aigu pour avancer ainsi derrière *a*. Lors donc que le balancier tourne de B en *ec*, il dégage seulement le talon *b*, et celui *a* rentre sans aucun effet; alors la dent K, devenue libre, avance jusqu'à ce que celle I soit appuyée en dedans du bras *a*, ce qui permet aussi à la première dent A d'agir sur la levée du cercle d'échappement, mais, comme on l'a dit, seulement une fois sur deux vibrations; la première de *c* en *c*B, dégageant A, ne produit qu'une *préparation* d'un cinquième de vide, restant comme muette, tandis que la seconde de B en *ec* laisse agir la roue sur le cercle d'échappement. Ainsi, cette espèce d'ancre n'ayant point de plans d'impulsion, c'est le doigt seul ou la dent du balancier qui la fait basculer au moyen de la fourchette, et c'est la roue seule qui imprime directement elle-même l'impulsion ou réparation sur le cercle d'échappement et au balancier qui fait corps avec lui. Nous n'avons pas besoin d'ajouter que, dans tous les échappements libres, si l'impulsion est donnée au cercle ou au balancier par la roue ou par l'ancre, c'est toujours le ressort spiral qui ramène le balancier et le cercle, et qui joue ici un rôle encore plus important qu'ailleurs, sous le rapport de sa propriété isochrone, quand on est parvenu à trouver la longueur du spiral d'où dépend uniquement l'*isochronisme*.

1161. « Dans tous les échappements à vibrations libres qui ont été composés par les

« artiste françois, dit *Berthoud*, et dont plusieurs ont été décrits ci-devant, la roue d'é-
« chappement n'agit sur le balancier que de deux en deux *vibrations*, et de cette manière
« son action s'exerce avec très-peu de frottement. Mais la construction de l'artiste an-
« glois, *Thomas Mudge*, diffère en entier des autres; car il a simplement employé l'é-
« chappement à repos des Horloges à secondes à pendule, comme on le voit figure 7,
« pl. XXVIII, dont A est la roue d'échappement et B l'ancre; et par ce moyen la roue
« restitue la force au balancier à chacune de ces vibrations. Pour cet effet, l'axe B de
« l'ancre porte la fourchette (*ou long bras*) B *b c*, dont le bout *b c*, fait en fourchette, est
« contenu dans la cage. Chacun des bras de cette fourchette fait l'office de dent pour agir
« sur les palettes 1, 2, formées sur deux cylindres que porte l'axe du balancier C. Cha-
« cun des bras de cette fourchette agit successivement sur une des palettes et en sens
« contraire, selon que le balancier va et revient. Cette action sur les palettes s'exerce en
« un temps très-court, en sorte que le balancier se trouve isolé, et par conséquent oscille
« librement pendant que l'action de la roue est suspendue *sur les bras* de l'ancre d'é-
« chappement B. » (Les *bouts b c* de la fourchette, dans les repos, restent toujours à une petite distance des portions de cercle.) *Les cercles* 1, 2, *sont à deux hauteurs différentes, et les bras b c aussi*. (*V.* 1, 2 *et b c*, *fig.* 8.)

1162. Cette description de *Berthoud* et sa figure en plan, d'après un dessin fait, dit-il en note, sur un modèle du Conservatoire des arts et métiers, sont fautives; les bras *b c* sont trop longs et trop au centre de C, les levées 1, 2 sont à contre-sens, etc. Nous y suppléons en exposant à côté, fig. 8, une copie de celle qui est gravée dans l'ouvrage anglais de *Mudge*. Parmi les différences qu'elle présente, on voit dans un développement ombré du haut, à gauche de la figure 8, que la fourchette porte, à l'extrémité de chacun de ses bras, une petite masse cylindrique. L'une *b* est plus haut que l'autre 2 *c*, et elles agissent alternativement sur les faces ou levées des entailles 1, 2, fig. 7, des mêmes cercles 1, 2, fig. 8, placés aussi à deux hauteurs différentes de l'axe du balancier. Ces deux cercles ou cylindres entaillés sont de moindre diamètre, dans la figure 8, que en C, fig. 7. Au-dessus des deux bras de la fourchette, ici plus courts, on aperçoit en *g* une languette de sûreté, dont l'extrémité trouve sa place, sans contact, dans une entaille pratiquée à la portion cylindrique *h*, portée aussi par l'axe. Cette entaille, se trouvant ici sur le profil, ne peut être aperçue; elle reçoit la languette sans y toucher, comme dans l'échap. de *Robin*, et empêche la fourchette, lorsqu'elle a passé la ligne des centres, de revenir sur elle-même en cas de secousse accidentelle; car, du reste, elle ne doit pas toucher à l'axe. Dans la figure du milieu, même n° 8, la forme est plus simple; les bras sont de niveau avec la branche et embrassent une cheville en acier ou en pierre fine, comme dans les pièces anglaises actuelles; cette cheville est indiquée sur la saillie *a* en quart de cercle portée par l'axe. A droite, on voit la même fourchette avec sa languette rapportée à vis, et au-dessus en *d* le *noyau de sûreté* entaillé. Du reste, ce ne sont pas encore là des modèles ni des mesures à copier. Nous ajouterons que les échappements d'une seule impulsion sur deux vibrations ne sont ni plus ni moins exacts que ceux qui réparent à chaque vibration; et que, sur 40 échap. que nous venons d'exposer, il en est bien peu dont on puisse admettre l'application à l'usage civil.

1163. La première ébauche de l'échappement libre à ancre, bien qu'elle ait reçu depuis de notables améliorations, faisait déjà honneur à la sagacité et au talent de son auteur *Thomas Mudge;* elle réunit la plupart des conditions d'un échappement libre, les levées y sont égales des deux côtés. On donne aujourd'hui un peu de pente vers l'arrière aux repos de l'ancre, au lieu de les tenir concentriques, pour produire le peu de tirage qui prévient les accotements des bras de la fourchette contre le noyau de sûreté de l'axe du balancier; on fait aussi porter à l'extrémité des dents, des plants inclinés qui produisent eux-mêmes une moitié de la levée, etc. On a reproché à cet échappement le frottement de deux pivots de plus, mais il n'altère point sensiblement la marche, puisque des pièces marines, éprouvées dans des voyages de long cours et pourvues de ce même échappement, n'ont pas marché moins régulièrement que d'autres avec échappement *à cercle et détente.*

1164. *Thomas Mudge* ne paraît pas avoir été aussi heureux dans son échappement libre à remontoir, que nous avons cité déjà, mais sans détails, ainsi que l'opinion de *F. Berthoud* sur ce sujet (V. nos art. 735, 736 et suiv.). L'occasion actuelle nous engage à placer ici la description de cet épanchement, extraite et traduite par *Berthoud,* d'un savant mémoire de M. *Atwood,* qui se trouve dans les *Transactions philosophiques* de 1794, sous le titre de « *Recherches* sur la théorie du mouvement, pour déterminer le temps des vibrations du balancier d'une Horloge, par *Georges Atwood,* membre de la société royale. V. *Bibl. Britann.*, t. III, *sciences et arts,* p. 378. » Nous rapportons cette description comme une preuve que des combinaisons qui semblent offrir le plus d'espoir de succès ne répondent pas toujours aux efforts de leur auteur, et qu'en ce genre, comme en bien d'autres, l'expérience prolongée dément trop souvent les théories les plus ingénieuses (1).

Échappement anglais à remontoir de Thomas Mudge.

« Dans la fig. 4, pl. XXX, *bb* représente le balancier en perspective, dit *Berthoud;* le ressort spiral attaché à son axe C A, et qui occasionne ses vibrations, se voit en *tt*, en perspective. L'axe est discontinué depuis A jusqu'en D pour faire place à d'autres mobiles.

« Les parties C A et D H sont réunies au moyen d'une branche ou manivelle doublement coudée A X Y D, laquelle, faisant partie de l'axe ou verge C A D H, vibre avec cet axe et avec le balancier lui-même sur les deux pivots C et H. L M, Z W, sont deux petites verges attachées à la manivelle aux points L et Z, et parallèlement à X Y, ces verges vibrent aussi par conséquent avec le balancier. G R est un axe ou verge particulière, située dans le prolongement de l'axe C A du balancier, mais qui est tout à fait indépendante. Cette verge porte à angle droit un bras G O et un petit ressort spiral auxiliaire, vu en perspective en *u;* ce ressort se tend lorsqu'on tire à soi le bras G O, dans le sens où l'arbre G R tourne sur ses pivots. On voit à cet arbre une palette à face courbe, qui est en prise avec une des dents de la roue *lm;* la dent, en procédant contre la surface de la palette par l'action du ressort moteur de l'Horloge, pousse cette palette et par conséquent fait avancer

(1) On trouvera dans la planche XXX suivante, fig. 4, l'échappement à remontoir de *Mudge.*

dans le sens opposé le bras GO ; elle tend en même temps le ressort auxiliaire *u*. Une petite projection ou saillie au bord de la palette empêche que la dent n'aille plus loin, lorsque le bras a été mis en mouvement dans un arc d'environ 27° : c'est donc la quantité angulaire qui correspond à la tension du ressort auxiliaire *u*, par l'action de la roue.

« FI est un autre arbre situé dans le prolongement du précédent, et dans la ligne CADH; il est semblable en tout à celui qu'on vient de décrire. Cet arbre FI porte le bras IK, et il a, comme le précédent, un ressort spiral auxiliaire V, qui se tend lorsque le bras est poussé en arrière. On voit à cet arbre une palette construite comme la précédente, et qui répond à la partie inférieure de la roue de rencontre; l'action de cette roue sur la palette lui fait décrire comme à la précédente, mais dans un sens opposé, un arc de 27°, et ne va pas plus loin, à cause du rebord de la palette qui oppose à la dent un point d'arrêt. On comprend comment l'action alternative des dents sur les palettes qui se trouvent en prise dans les parties supérieures et inférieures de la roue de rencontre, imprime à ces palettes et aux bras qui leur sont opposés et tiennent à l'arbre correspondant à chacune d'elles, des mouvements alternatifs dans deux sens opposés, mouvements qui, tour à tour, bandent les ressorts auxiliaires *u* et V. Cet échappement ressemble assez, dans cette partie, à l'échappement ordinaire à roue de rencontre, excepté que les deux palettes appartiennent à deux arbres différents, que leur surface est courbe et munie d'un rebord, et que le balancier est indépendant des axes auxquels appartiennent ces palettes. Voyons comment elles l'influent à leur tour.

« Supposons que lorsque le balancier est en repos, et que le ressort moteur n'est pas remonté, les points de repos des spiraux auxiliaires coïncident avec celui du spiral qui appartient au balancier; alors les deux bras GO, IK, touchent, l'un d'un côté, l'autre de l'autre, les verges ou chevilles LM, ZW, qui appartiennent à la manivelle et par conséquent au balancier dont elle fait partie; ces bras les touchent, mais sans leur communiquer aucune impression, aucune action. Si alors on remonte la Montre, l'action du ressort moteur, qui tend à faire tourner la roue de rencontre, fait passer l'une de ces dents contre la palette supérieure; par exemple, cette impression lui fait décrire, et au bras GO qui lui est opposé, un angle de 27°, après quoi la dent reste en prise contre le rebord de la palette. Ce mouvement n'a dû donner aucune impulsion au balancier, parce qu'il a lieu dans le sens où le bras GO se dérobe au contact de la cheville LM, et non dans celui où il faudrait pousser tout le balancier avec elle; il n'y aura donc point de vibration.

« Mais si une force extérieure agit sur le balancier dans le même sens, et lui donne une impulsion capable de lui faire décrire un arc, par exemple, du 135°, comme cela a lieu dans la construction de M. *Mugde*, alors le balancier entraînera la manivelle AXYD et les deux verges LM, ZW; et lorsqu'il aura décrit un arc de 27°, la verge LM rencontrera le bras GO; et l'emmènera dans le sens où elle se meut; elle dégagera en même temps, du côté opposé à ce bras, la dent qui se trouvait en prise contre le rebord de la palette; cette dent échappe et la roue est libre un instant; mais, la dent inférieure rencontrant l'autre palette immédiatement après, la presse, et tend jusqu'à l'angle du 27° le ressort auxiliaire qui appartient à l'arbre de celle-ci; là elle s'arrête, se trouvant en prise

contre le rebord de la palette ; pendant que cette action s'exerce, le balancier achève son arc, qu'on pourrait appeler supplémentaire, d'environ 108° ; et il entraîne avec lui le bras G O pendant toute la durée de cette vibration ; lorsqu'elle est achevée, le ressort auxiliaire V a été bandé d'une quantité équivalente à un arc de 135°, savoir, 27° par l'action de la dent sur la palette, et 108° par l'entraînement du balancier ; celui-ci revient ensuite en arrière par la double action de son propre spiral, et du spiral auxiliaire *u*, qui agit sur lui par le contact du bras G O, lequel ne cesse point de le presser. L'accélération que lui donnent ces deux ressorts réunis est terminée, lorsque le balancier en retour est arrivé à leur point commun de repos ; mais lorsque, par son mouvement acquis, il a procédé dans sa vibration environ 27° au delà de ce point de repos, alors la cheville Z W rencontre le bras I K, et, en l'emmenant avec elle, elle dégage la dent inférieure qui était en prise contre la palette ; le balancier achève sa vibration, et la dent supérieure de la roue, rencontrant aussitôt après la palette supérieure, bande le ressort auxiliaire *u* comme ci-devant, etc. Le balancier, en achevant son arc de vibration, bande le ressort auxiliaire V, puisque le bras I K, qui y est attaché, décrit avec le balancier l'arc supplémentaire de 108°. Cet arc achevé, le balancier revient par l'action réunie de son propre spiral et du spiral auxiliaire V : l'action de ces deux ressorts se termine comme ci-devant, lorsque le balancier est arrivé à son point de repos ; il continue sa vibration par l'effet de son mouvement acquis, et ainsi de suite. »

1165. Nous avons rapporté textuellement ici la traduction de *F. Berthoud*. Si l'on ne la trouve pas d'abord très-intelligible, il faut l'attribuer sans doute au texte original, ainsi qu'à la complication des effets. Nous tâcherons de l'éclaircir par quelques suppléments qui seront joints prochainement à la figure. Nous feront seulement observer à l'avance que cette construction n'a pas été plus répétée que tant d'autres abandonnées par suite d'anomalies irrémédiables. *Berthoud* remarque que l'on trouve déjà ici 4 pivots de plus, des points de contact multipliés, un accrochement peu sûr des dents de la roue d'échappement, deux spiraux aussi de plus, complication qui ne tend que trop à confirmer l'opinion de *Berthoud* à ce sujet (736), et qui ne paraît que juste ; mais les erreurs connues d'hommes habiles d'ailleurs, sont des jalons semés sur une route dangereuse, dont ils signalent les écueils, et cet exemple est une preuve utile de la difficulté d'établir un bon *échappement à remontoir*.

Des quantièmes ajoutés aux Montres et aux Pendules.

1166. Parmi les divers produits de l'Horlogerie, on peut considérer comme un avantage utile et commode l'adjonction soignée des quantièmes, qui donnent au premier coup d'œil les divisions du temps de l'Almanach ou Calendrier, autres que celles des heures, minutes et secondes, bien qu'elles soient produites dans les machines par le même *Mouvement*. L'indication des jours du mois fut appliquée en premier lieu à des Montres portatives déjà faites, mais d'une manière tellement négligée la plupart du temps, que ce mécanisme, privé de la sûreté qu'il exige, fut bientôt abandonné comme nuisible à la

régularité générale de la machine. Ce défaut ne provenait néanmoins que d'une exécution trop imparfaite : on ajoutait presque toujours à des Montres déjà établies sans quantième, un pignon placé sur la roue des heures de la minuterie, lequel engrenait avec une roue particulière de renvoi excentrique; celle-ci portait en dessus une cheville pour faire sauter le quantième à minuit, en entraînant une fois par jour une seule dent d'une seconde roue concentrique et à canon, dite proprement de quantième, pourvue de 31 dents taillées en étoile, et maintenue immobile dans le reste des 24 heures, par un ressort à sautoir. Le canon de cette même roue de sautoir roulait sur celui de la roue des heures, et comme il avait peu de hauteur, et qu'il y avait dans cette partie les jeux de deux canons superposés sur celui de chaussée, il en résultait souvent des déversements qui faisaient manquer l'effet voulu. La cheville de la roue de renvoi du quantième ne pouvant avoir assez de hauteur sous le cadran déjà établi, où elle frottait même souvent, s'engageait parfois sous la roue du quantième et la soulevait, ce qui en faisait accrocher l'aiguille avec celle des heures et occasionnait l'arrêt du mouvement; d'autre part, le sautoir, faute de place sous le cadran, affleurait trop juste le dessus des dents de la roue de quantième et désengrenait aisément par les déversements de celle-ci. Ces accidents arrivaient d'autant plus aisément, que les roues étaient très-minces, par la nécessité de trouver sous le cadran l'espace d'une roue et d'un pignon surajoutés au centre. Le cadran était toujours très-*bombé*, et si son élévation au centre était suffisante, elle ne l'était pas à la distance du centre où se trouvait le sautoir et où passait la cheville de la roue de renvoi pour le quantième, etc.

1167. Il n'en est pas moins vrai que dans les Montres construites exprès pour avoir un quantième du mois, et où l'on a réservé la hauteur propre à permettre de placer un pont sur lequel seul roule alors la roue du quantième, ce qui en débarrasse la roue des heures, lorsque la roue de renvoi roule sur une broche de bonne hauteur, et qu'enfin tous les jours se trouvent ménagés convenablement, on obtient des résultats parfaitement réguliers. Nous faisons usage, depuis près de cinquante ans, d'un quantième de ce genre établi dès le principe dans une répétition à demi-quart, et ce quantième n'a jamais manqué, ni occasionné d'irrégularités dans le mouvement. On sait aussi que le simple quantième des jours du mois ne manque point son effet dans les bonnes Pendules, où l'espace abonde ordinairement, et où un doigt, conduit par l'engrenage d'un pignon particulier avec le barillet de sonnerie, fait seul sauter la roue du quantième, portée d'ailleurs aussi par un pont particulier. Il est donc constant que la régularité de ce mécanisme s'obtient aisément de sa juste disposition et d'une exécution soignée, qui ne présentent pas naturellement de grandes difficultés; mais il n'en est plus de même quand divers quantièmes de semaine, de noms des mois, etc., se trouvent compliqués avec les autres mouvements de la Pendule, il y a là souvent plus d'obstacles.

1168. Cependant les quantièmes ordinaires des jours du mois ont toujours présenté dans les Montres et Pendules un autre inconvénient qui provient de l'inégalité de nos mois civils de 28, 29, 30 et 31 jours. On y est obligé de faire sauter à la main l'aiguille de quantième dont la roue ne peut porter que l'un ou l'autre de ces deux derniers

nombres : or il n'est que trop commun d'oublier cette petite opération, et de manquer par suite des affaires essentielles. Pour opérer le changement indispensable dans certains mois, il faut recourir à l'Almanach, et si l'on a oublié la correction au temps voulu, il faut encore savoir le jour précis de la semaine, ne fût-ce que pour retrouver sur l'Almanach le quantième du jour du mois. Feu *Abr. Bréguet*, qui ajouta très-souvent un tel quantième à ses montres construites exprès, dont l'ensemble était extrêmement soigné, mais d'un prix encore plus élevé, chercha à sauver en partie cette difficulté, en divisant son cadran sur le nombre 31 et en marquant un zéro à la place du 31ᵉ jour; la roue était divisée sur ce même nombre, mais une dent plus courte ou supprimée laissait arrêter l'aiguille sur le zéro à la fin du mois, et avertissait ainsi de l'omission du changement nécessaire. Cependant, lorsqu'il n'y avait qu'un jour ou deux d'oubli, on pouvait encore s'y tromper, et il fallait d'ailleurs toujours consulter l'Almanach pour réparer une erreur qui pouvait en occasionner d'autres beaucoup plus importantes.

1169. Il n'y avait alors de quantième à l'abri de ces inconvénients que celui des Pendules d'*Équation* dont nous avons parlé (art. 749 et suiv.). Nous y avons dit que l'Équation est la différence diurne entre les jours solaires inégaux, et les jours moyens et parfaitement égaux. On sait déjà que, si dans ces Pendules bien réglées, le *temps moyen* est marqué par l'aiguille de minutes qui porte ce même nom, une autre aiguille, dite *solaire*, y marque les retards et les accélérations du méridien terrestre à l'égard du soleil. Or, cette correction ne pouvant être opérée qu'au moyen d'une courbe irrégulière portée par une roue annuelle, cette roue tournant en un an peut porter la division inégale des mois de 28, 29, 30 et 31, marquée par un index mobile au besoin. Il n'y avait guère alors que ce moyen d'avoir un quantième annuel. Cependant les différences du mois de février portant 29 jours dans l'année bissextile, et 28 dans les trois autres années, obligeaient encore de déplacer d'un jour pour la quatrième année cet index, qu'il fallut rendre susceptible de ce petit déplacement. On ajouta enfin au mécanisme déjà considérable de l'équation annuelle, un moyen mécanique de remédier à la différence de l'année bissextile; ce fut la double fonction d'une étoile tournant en quatre années, qui fait sauter pendant trois ans deux divisions à la fois à la fin de février portant alors 29 jours, mais qui n'y fait sauter qu'une division à l'ordinaire pour l'année bissextile. Nous devons renvoyer pour les détails aux articles indiqués ci-dessus.

1170. Tout ce travail d'une Équation est considérable et exige trop de précision pour n'être pas toujours rare et dispendieux. Quoique fort intéressant pour plusieurs amateurs, il est un peu moins recherché aujourd'hui, depuis que l'usage du *temps moyen* pour régler les Horloges publiques, si tardivement et difficilement établi, dispense de s'occuper civilement du temps solaire, que l'on ne suit plus que dans la campagne, et trop souvent encore dans nos villes de département.

1171. On a imaginé en divers temps d'autres moyens de joindre le quantième des jours du mois au mécanisme des Montres. *Thiout* en cite un établi au fond de la boîte

et paraissant au dehors par une ouverture de cette boîte, mais dont le changement s'opère en débouchant le trou de la cuvette au travers duquel le mouvement est remonté. Cette construction peu assurée n'a pas été imitée ni renouvelée depuis. Les autres moyens pour Montre ou Pendule qu'il rapporte, résultent d'une Équation ou de quelque autre indication astronomique, lesquelles nécessitent une roue annuelle.

1172. On a été jusqu'à placer le quantième des jours du mois dans la clef d'une Montre portant par elle-même un petit cadran et une roue de sautoir déplacée chaque jour par une tige mobile occupant l'intérieur de cette partie qu'on appelle *carré* ou *nez* de clef. Cette tige était repoussée par le carré de la Montre chaque fois qu'on la montait, et faisait ainsi sauter le quantième de la clef. On conçoit qu'il ne fallait pas faire usage de cette clef deux fois dans un même jour, ce qui peut arriver néanmoins lorsque, par suite de préoccupation, on ne se rappelle pas si la Montre a été remontée et que l'on essaye de s'en assurer avec la clef. Ces moyens toutefois ne peuvent s'appliquer aux Pendules qui ne sont remontées au plus tôt que tous les septièmes jours, et plus communément aux quinzièmes, et même quelques-unes à la fin seulement de chaque mois. *Les quantièmes dits à guichet sont très-sujets à manquer.*

1173. Le plus grand inconvénient de presque tous les quantièmes est de charger le mouvement de la pièce de produire leurs effets, et d'embarrasser le cadran d'une aiguille de plus; la négligence que l'on a souvent portée dans la confection du mécanisme que l'on considérait à tort comme peu exigeant, est la cause principale du dégoût des amateurs, surtout à l'égard des quantièmes de Montre. Nous traiterons encore de ce sujet lorsque nous serons arrivés au chapitre des Montres modernes perfectionnées et disposées alors exprès pour indiquer plusieurs effets; mais comme ceux-ci exigent des soins particuliers pour ne pas nuire au mouvement et être commodes à l'usage, on ne les trouvera réunis et indiqués pour les Montres que dans des pièces rares et d'un haut prix.

1174. Quant aux quantièmes des Pendules, nous exposerons ici une disposition nouvelle et solide, toute particulière, et qui a l'avantage d'être entièrement séparé du *mouvement* sur lequel elle n'a aucune influence. Elle n'a de communication qu'avec le barillet de sonnerie, qui ne peut en aucun cas en être gêné. Ce moyen nous a paru réunir la sûreté et la solidité, sans exiger du propriétaire aucun soin de conduite, et sans rien ajouter aux divisions habituelles d'un cadran simple.

Les aiguilles de ce quantième, qui donne les indications ordinaires cherchées dans un Almanach, sont placées sur un ou plusieurs cadrans, ce qui peut aisément convenir et contribuer au décor accoutumé des boîtes de nos Pendules actuelles. On peut aussi adapter ce quantième à toute autre forme, ancienne ou récente.

Nota. — En exposant dans cet ouvrage plusieurs perfectionnements modernes, nous n'établirons point de comparaison entre eux; chacun aura son mérite et son utilité, que nous soumettons au jugement des vrais artistes, c'est-à-dire de ceux qui réunissant le talent, l'expérience et l'instruction modeste, sont exempts de la fièvre de l'*envie*, et savent juger impartialement les productions des autres, sans en être *jaloux*.

QUANTIÈME PERPÉTUEL, BISSEXTILE ET SÉCULAIRE

MARQUANT SUR UN MÊME CADRAN OU SUR PLUSIEURS, LES JOURS DE LA SEMAINE, CEUX DU MOIS ET LES NOMS DES MOIS,

PAR M. BIENAYMÉ, HORLOGER A DIEPPE.

(Extrait du rapport fait à la Société chronométrique de Paris.)

La disposition générale de ce *quantième* diffère entièrement pour ses mois de celle ordinaire, en ce que la principale aiguille de celui-ci, celle du mois ou de *date* qui conduit tout le mécanisme, ne se meut, à l'instant de minuit, que par l'écoulement uniforme d'un rouage modéré par un volant.

L'ensemble se compose d'un rouage à part, mené par son barillet particulier, et monté dans une cage à deux platines rondes, assemblées par trois piliers. La cage a un peu moins de deux pouces et demi de diamètre et environ un pouce de hauteur ; elle porte un faux cadran à trois piliers courts, qui couvrent quelques pièces de cadrature. Les mobiles sont disposés en partie comme dans un mouvement simple à ressort, et ont une heureuse analogie, pour la solidité et la facilité d'une bonne exécution, avec ceux d'une sonnerie ordinaire ; le tout peut s'appliquer à des Pendules déjà établies.

Le rouage intérieur de la cage se compose d'un barillet, d'une première et d'une deuxième *roue* dites *de temps*, puis d'une roue du centre à longue tige portant sous le cadran une chaussée avec ses roues de minuterie, celles-ci dentées suivant les nombres ordinaires pour conduire des aiguilles d'heure et minute. La roue du centre mène dans la cage une quatrième roue semblable à celle de sonnerie dite d'étoteau, mais garnie de trois chevilles arrêtées successivement sur un bras de *détente-à-couteau*. Cette quatrième roue mène une cinquième roue *de délai* engrenant avec le pignon d'un volant, et garnie d'une cheville arrêtée et quittée immédiatement par une détente de préparation ; celle-ci est atteinte une fois chaque jour par le même moyen que le sont les rouages à musique annexés à une Pendule. La petite platine porte en dehors un grand chaperon ou *roue de compte* qui, étant excentrique, la dépasse en partie d'un côté. Il y a aussi de ce côté et en dehors deux roues plates dont une a sa révolution quadriennale pour les années bissextiles, et l'autre a sa révolution *séculaire* pour la correction de la centième année.

Le rouage ne défile chaque jour que pendant la durée d'une à deux secondes, nécessaire au déplacement des aiguilles sur le cadran. Le chaperon ne faisant sa révolution qu'en une année, si le ressort moteur du barillet de ce rouage développe seulement cinq tours, le calcul est tel qu'il peut n'être remonté qu'après vingt-cinq ans, au moyen du carré de l'arbre qui aboutit à l'ordinaire à l'ouverture de son cadran pour le remontage.

Jusque-là, on n'a employé ici que des dispositions analogues à celles d'une sonnerie, sauf les nombres calculés pour les effets à produire, et l'exécution en est aussi facile. Ce

rapprochement simple n'en paraît que plus heureux. La cage peut être adaptée aisément à toute espèce de Pendule qui en offre la place, sauf à varier quelques moyens accessoires de rapport suivant les cas particuliers.

Il y a ici trois pièces principales à considérer : la première, qui fait sa révolution en un an, et c'est le chaperon ; la deuxième, qui tourne en un mois, c'est la roue du centre ; la troisième tourne en trois jours, c'est la roue d'étoteau, dont chacune des trois chevilles forme le temps d'arrêt de chaque jour. La première grande roue intérieure qui porte le chaperon hors de la petite platine et faisant comme lui une révolution en une année, produit dans cet intervalle 12 révolutions de la roue du centre ou de longue tige ; celle-ci porte sur le cadran l'aiguille du quantième du mois ; sa révolution est de 31 jours, et produit 10 tours 1/3 de la roue d'étoteau ; et comme cette dernière porte 3 chevilles, et que $10\ 1/3 \times 3 = 31$, les 31 mouvements composant un mois sont produits ; chaque distance de cheville de la roue d'étoteau produit trois tours de la roue de délai, et chaque tour de la roue de délai, sept tours du volant.

D'après cet exposé, les 12 mois de 31 jours formeraient une année de 372 jours ; il y aurait donc une erreur en excès de sept jours dans les années communes et de six pour la bissextile ; mais cet excédant nécessaire se trouve rectifié dans la révolution du chaperon ; celui-ci porte au bord de son limbe cinq saillies qui, placées à la fin des 4 mois de 30 jours et de celui de 28 (février), tiennent la détente levée assez de temps pour laisser passer deux chevilles de la roue d'étoteau, au lieu d'une pour les mois de 30 jours, et 4 chevilles au lieu d'une pour le mois de 28 ; et par ce moyen l'excédant disparaît pour l'année commune (la saillie de février occupe une portion triple sur la circonférence du chaperon).

La bissextile se trouve encore produite au moyen du chaperon ; celui-ci porte au centre, en dessous de son assiette, un pignon de huit qui engrène avec une roue de 32 dents placée sur la petite platine. Cette roue fait sa révolution en quatre ans, et porte une cheville *mobile elle-même au besoin* et qui, à chaque quatrième année, vient faire rentrer une petite bascule portée par le chaperon derrière la saillie du mois de février ; elle y est maintenue d'ordinaire en place par un assez fort ressort. Cette bascule double l'épaisseur de la saillie du chaperon en s'élevant à fleur du bord, pour soulever comme elle le couteau de la détente d'étoteau ; mais comme elle porte un peu plus d'arc angulaire, elle fait commencer l'effet de la saillie du chaperon un jour plus tôt en février, lorsque celui-ci n'a que 28 jours ; mais quand une cheville de la roue quadriennale fait rentrer la petite bascule du chaperon, le couteau n'est atteint et soulevé qu'un jour plus tard, et alors le mois de février marque jusqu'à 29 jours pour que l'année soit bissextile. Ainsi la marche du quantième est sans erreur jusqu'à la fin du siècle, époque où il faut remplacer la dernière bissextile par une année commune ou moyenne.

A cette effet, la roue quadriennale qui produit la bissextile et ne tourne qu'en quatre ans, porte en dessous une autre cheville fixe qui, à chaque révolution, fait sauter une dent d'une autre roue à sautoir et de vingt-cinq dents, n'achevant sa révolution qu'en un siècle ; celle-ci, munie aussi d'une cheville, fait mouvoir à la fin du siècle une autre

détente qui déplace la cheville *mobile au besoin* de la roue quadriennale, et supprime son effet (comme bissextile) pour cette dernière quatrième année du siècle, laquelle reste ainsi moyenne, par exception séculaire, ainsi que l'exige le Calendrier grégorien.

Les jours de la semaine sont marqués sur un petit cadran excentrique, au moyen de l'aiguille d'une roue de sautoir à sept rayons dont l'un est atteint par un bras de la détente des jours du mois ; et cette partie, seulement accessoire au mécanisme perpétuel, est sous le cadran et peut être retranchée ou adjointe à volonté, sans rien changer d'essentiel au reste de la machine.

Nous avons dit, vers le milieu de ces articles, que la roue du centre tournant en un mois porte sur le cadran l'aiguille du quantième des jours du mois; sa longue tige traverse une chaussée, comme dans la minuterie de la Montre, avec un engrenage de renvoi, et une roue de canon, dont l'aiguille marque les douze mois écrits sur le cadran, en place des douze heures d'un cadran ordinaire ; car on s'est attaché à rapprocher ce mécanisme de la disposition commune et usitée dans toutes les parties qui le permettent, afin d'y conserver la facilité et la solidité d'une construction déjà éprouvée. Les autres combinaisons ci-dessus n'étaient pas aussi faciles.

Pour réunir la réduction et la clarté des divisions, ce calibre a reçu depuis une forme allongée et plus étroite, où l'on a distribué les aiguilles sur trois cadrans d'égale grandeur sur un même plan, à la suite l'un de l'autre ; cette nouvelle disposition s'adapte plus facilement à la base des boîtes de Pendule ; la plaque des cadrans y forme un carré long susceptible d'ornement, ainsi qu'on le voit figures 2 et 3.

Les effets sont ici les mêmes, mais la roue annuelle, au lieu d'être dans la cage, se trouve sur la petite platine. La seule addition consiste en ce que, le chaperon étant d'abord du diamètre de la cage pour contenir les trois cent soixante-douze divisions, elles ont été classées ici en deux parties, au moyen de deux chaperons, l'un sur la roue annuelle dont la révolution est de douze mois, l'autre sur la roue *de date* ou des jours, dont la révolution est de trente et un jours ; il sont ainsi indépendants entre eux et fonctionnent sans s'influencer pendant les mois de trente et un jours, leur contact n'ayant lieu que pour les mois de vingt-huit et trente jours.

Le chaperon de date porte à sa surface, sur le bord, trois détentes formant saillie, l'une de deux jours pour les mois de trente jours, la seconde de trois jours pour les mois de vingt-neuf jours, et la troisième de quatre jours pour les mois de vingt-huit jours ; ces trois détentes portent chacune une cheville sur laquelle le chaperon des mois vient s'appuyer, ce qui produit l'élévation pour les mois de 30 jours. Le mois de février change à l'aide d'un petit chaperon placé sur celui des mois. Les quatre saillies portées par ce petit chaperon représentent les trois années communes, plus la bissextile, dont le mois de février a 29 jours tous les quatre ans. Les effets sont au fond les mêmes que dans le quantième à platines rondes, quoique plusieurs mobiles soient ici construits et placés différemment. Dans le premier quantième la roue séculaire est à sautoir et porte vingt-cinq dents ; elle est menée par la roue quadriennale, qui, à chacune de ses révolutions, fait sauter une des vingt-cinq dents. Dans le nouveau système, deux roues engrènent ensemble et

font leurs révolutions en vingt-cinq ans ; elles sont pareillement menées par la roue quadriennale, et achèvent l'une et l'autre leur révolution principale en même temps, c'est-à-dire en un siècle. L'effet pour supprimer la bissextile est le même.

Pour les quantièmes de semaine, de nom de mois, ce sont autant d'articulations particulières que l'on peut admettre ou retrancher à volonté, sans nuire au mécanisme ; l'auteur s'est réservé d'y joindre au besoin un *millésime* progressif, quoique peu usité.

Explication de la partie d'appareil annexée au mouvement de la Pendule.

Cet appareil particulier se compose d'abord d'une roue et d'un pignon. Celui-ci est de même nombre que celui de la roue de mouvement, et engrène avec le même barillet ; il porte sur son axe, en dehors de la platine des piliers, un autre pignon qui forme engrenage avec une roue de chaussée placée entre les deux barillets : l'axe de cette roue est une verge traversant la cage et portant, du côté de la petite platine, un doigt qui fait lever la détente et partir le quantième ; de l'autre côté est un carré dont la longueur traverse le cadran, pour mettre le quantième à son point, avec une clef qui porte un index.

Table des nombres à donner aux pignons et aux roues formant l'appareil annexé à une Pendule pour faire partir le quantième.

Nombres de la roue du mouvement.	Nombres des ailes des pignons.	Nombres des dents des roues.	Révolutions pour chaque série.
80.	10.	24.	2...4/10"
78.	13.	32.	2...6/13"
76.	19.	48.	2...2/19"
75.	25.	64.	2.14/25"
72.	12.	32.	2...8/12"

L'aiguille des jours de la semaine est portée sur une roue en étoile et à sautoir. Un pignon, engrenant avec la roue d'étoteau et faisant une révolution diurne, porte, du côté du cadran, une roue dont une cheville fait passer une dent de l'étoile. Un bras de la détente des jours du mois porte à son extrémité une autre cheville qui vient empêcher l'étoile de sauter plusieurs jours, quand la détente est levée et que le mois a trente ou vingt-huit jours. L'aiguille des mois est portée de même sur une étoile que fait sauter la chaussée placée sur la roue du centre.

Ces explications peuvent mettre sur la voie de moyens propres à représenter des époques inégales. L'auteur, du reste, s'est réservé la propriété de son ingénieuse invention par un *brevet ;* et les amateurs de ces productions utiles, curieuses et recherchées, doivent, pour leur sûreté, s'adresser directement et de préférence à l'inventeur, qui nécessairement en connaît mieux les détails et les exigences pour un service assuré.

Supplément à l'article (1169 et suiv.) *sur les pièces à équation.*

1175. L'article rappelé ici nous ayant entraîné à parler de l'équation du temps pour Montre et Pendule, nous en prenons occasion de mettre sous les yeux du lecteur une cadrature de ce genre pour la Montre, et qui peut aussi être adaptée à la Pendule; elle est d'une exécution plus simple et plus facile que celles de *Berthoud* et autres auteurs. L'original où nous la prenons porte une signature pseudonyme; mais on y reconnaît aisément la facture genevoise. Le calibre en est représenté pl. XXIX, figure 5.

Nous entrerons à ce sujet dans quelques détails pratiques qui en faciliteront le travail, pour peu que l'on prenne le soin d'en suivre pas à pas les indications.

1176. L'aiguille d'équation stationnaire pour chaque jour marque directement l'avance et le retard du temps *solaire* sur le temps *moyen* ou *égal*, par une aiguille concentrique à celles d'heures et minutes, et sur les mêmes divisions que celles des minutes; et comme on a réservé dans le haut la place de deux petits cadrans, celui de gauche pour la *date* des jours du mois, et celui de droite pour les noms de chaque mois, il en résulte que le calibre du mouvement est excentrique vers le bas, ce qui laisse d'autant plus de place et de grandeur au barillet qui agit par sa chaîne sur une fusée, dont le centre est en *a*. La fusée se remonte du côté de la cuvette. L'échappement de cette pièce est à cylindre; il peut être remplacé par tout autre échappement choisi à volonté.

La minuterie se compose à l'ordinaire d'un pignon de chaussée de dix ailes, conduisant sa roue de renvoi de trente dents, dont le pignon de 8 mène la roue de canon ou des heures de trente-deux dents. Les dispositions suivantes ne concernent donc que le mécanisme d'équation. La roue des heures de la minuterie, celle de trente-deux dents, engrène directement, c'est-à-dire sans pignon intermédiaire, et par sa denture même, avec une grande roue *de temps*, vue à gauche, et de soixante-quatre dents, roulant sur une tige fixe ou broche de la grande platine; cette roue de temps porte sur l'une de ses cinq barettes, ici celle du haut, en *g*, une cheville qui fait sauter, toutes les vingt-quatre heures, une dent de la roue de sautoir de 31 dents, pour la date du mois: cette roue passe au-dessus de la roue de temps, en haut et à la gauche du cadran; son sautoir y est vu du même côté. La roue de sautoir de trente et une dent, roulant aussi sur tige, porte en dessous une petite roue de vingt-quatre qui affleure presque la platine sans y frotter. Ces deux dernières roues sont fixées ensemble sur le même canon, comme ne formant qu'une seule pièce.

La roue inférieure de vingt-quatre engrène directement avec une roue de quarante-huit roulant aussi sur tige et centrée vers le milieu, un peu à gauche du rayon de midi de la platine (l'axe du barillet se trouve un peu plus près du centre des aiguilles, plus bas que celui de la roue de quarante-huit; on en déterminera la place précise en traçant le calibre du rouage).

La roue de quarante-huit dont on vient de parler, porte en dessus un pignon de dix menant la roue annuelle d'ellipse de soixante dents. Le canon de cette roue porte l'aiguille des noms des mois sur le petit cadran du haut, à droite, correspondant symé-

triquement à celui des dates du mois, aussi du haut, à gauche. La roue annuelle de soixante dents passe au-dessus de la roue de quarante-huit, et c'est sur cette roue annuelle qu'une ellipse d'acier est fixée.

Un râteau d'acier 8*rs*, ayant son centre de mouvement en *s*, conduit un pignon de seize roulant librement, mais avec le moins de jeu possible, sur le canon de la roue des heures. Un long ressort, comme celui d'une pièce des quarts, presse continuellement sur une cheville placée en dessous du râteau, pour en faire appuyer le bras *r* contre l'ellipse. Le pignon de seize porte son canon, aussi d'acier, jusqu'en dehors du cadran pour y recevoir à frottement ferme l'aiguille du temps solaire qui affleure le cadran ; celle-ci est en or, pour la distinguer de celles des heures et minutes en acier bleu.

Le râteau, dans la figure, appuie par son bras *r* sur le rayon le plus court de l'ellipse, époque du plus grand retard du temps solaire (celle du 11 février), c'est-à-dire pour un retard de quatorze minutes et environ trente-sept secondes. Le bras *r* du râteau est garni en dessous d'une sorte de cheville d'acier, en forme de petit rouleau rapporté sous le bras, avec une vis et un pied, et le débordant un peu, pour appuyer seul contre l'épaisseur de l'ellipse d'acier.

La partie du cercle ou limbe du râteau porte l'étendue de dix à onze dents, dont huit suffisent pour un demi-tour du pignon de seize. Les deux derniers intervalles de dent du râteau, n'étant pas fendus bornent sa course, et on entaille un peu à la main, suivant le besoin, l'un de ces deux derniers intervalles, pour que l'aiguille puisse arriver librement à seize minutes et un quart du côté de l'avance, c'est-à-dire à la droite du cadran (le retard à gauche n'arrivant qu'à quatorze minutes trente-sept secondes, le tout doit produire librement trente et une minutes).

Le râteau est divisé *à la plate-forme*, sur le nombre 128, contenant huit fois le nombre 16 du pignon. Les rayons *primitifs* ou de simple attouchement des circonférences *primitives* du pignon et du râteau doivent être entre eux dans le même rapport que les nombres respectifs des mobiles qui s'engrènent.

1177. Nota. Il faut bien observer ici que ce qu'on appelle circonférence *primitive* d'une roue ou d'un pignon est seulement le cercle que l'on suppose passer au pied des arrondis, au point juste où ces arrondis se confondent avec le flanc de leurs dents. Ainsi, les arrondis ou excédants des dents et des ailes sont entièrement en dehors des circonférences dites *primitives*, et les flancs droits des dents et des ailes sont en dedans de ces circonférences. Ce sont ces excédants des deux mobiles qui se croisent ou empiètent l'un sur l'autre, et forment seuls ce qu'on appelle la pénétration totale de l'engrenage. Les excédants ou arrondis d'une roue, comme d'un pignon, sont donc en surplus de leurs circonférences primitives. En traçant un calibre; on ne doit employer que les circonférences, ou rayons ou diamètres primitifs en rapport entre eux, comme les nombres, et on les fait se toucher seulement, puis on ajoute, en dehors de chacune, un deuxième cercle qui donne le surplus nécessaire aux arrondis, et ce surplus, qui forme le croisement ou empiètement pour l'engrenage, donne en même temps la circonférence *totale* ou le diamètre *total* de chaque mobile. C'est ce que l'on trouvera détaillé dans notre Traité

universel de l'engrenage qui fera partie du présent ouvrage; mais nous avertissons toujours ici d'avance de ces vrais principes.

Le canon de la roue d'ellipse porte sur le cadran l'aiguille des noms de mois; l'axe de cette roue est au même niveau (midi étant en haut) que celui des dates du mois, et leurs cercles sur le cadran sont de même grandeur et placés symétriquement. Le cadran, exécuté plat, repose dans une rainure de la boîte, où il est maintenu par trois pieds goupillés sous la grande platine, qui y pénètrent par les points marqués ici, 1, 2, 3. Mais, en cas de différence dans le calibre du rouage de mouvement, on peut aussi les placer ailleurs au besoin.

La roue de longue tige du mouvement ayant son axe au milieu du pignon de chaussée et étant ici excentrique, les points *b c* indiquent les trous des pivots des roues première moyenne et deuxième moyenne en place de roue de champ, pour le calibre actuel supposé; *c* n'est qu'une tige de précaution pour borner la course du râteau, qui ne doit pas quitter son repère avec le pignon quand on en essaye les fonctions.

Les mobiles, roues et pignons de cette cadrature doivent être tous repérés avec soin sur le point de départ du 11 février.

Quant à la situation des mobiles du mouvement, elle pourrait être différente de celle indiquée ci-dessus, leur position n'influant pas sur cette cadrature, pourvu que la roue du centre ou de longue tige reste à sa place relativement aux autres pièces qui sont sous le cadran, et en conservant toutes les autres proportions indiquées seulement dans la figure, mais qui devront être régularisées dans un calibre exprès tiré au net sur laiton. On en tracera donc un suivant ces conditions et à volonté pour le reste, ainsi qu'avec tel échappement que l'on préférera. Un côté portera le calibre du rouage, et sur l'autre côté, celui sous le cadran, on tracera les mobiles de l'équation.

En traçant les circonférences primitives des roues, se touchant seulement, suivant ce qui en a déjà été remarqué ci-dessus, on aura exactement les distances des centres.

Le zéro d'équation sur le cadran est le point de midi. C'est près des divisions ordinaires de minutes servant ici à l'équation que l'on marque sur le cadran à gauche, vers cinquante-deux minutes et demie, ou bien en dedans des heures, le signe du retard —, qui signifie *moins;* et de l'autre côté, à droite, dans la direction de sept minutes et demie, le signe de l'avance + qui signifie *plus : la situation de l'aiguille en peut dispenser.*

1178. Dans les grandes villes, où l'on suit le temps moyen toujours égal, l'équation sert à le distinguer du temps inégal de la campagne, réglé par les cadrans solaires. Cependant la présente équation exige, comme plusieurs autres, que l'on ait soin de faire changer le quantième des jours du mois à la fin et au besoin, pour leurs différences de 28, 29, 30 et 31; ce qui ne consiste qu'à faire sauter en avant, avec le bout de la clef, la petite aiguille du quantième de gauche qui remet tout le reste à sa place. Si on a oublié l'opération pendant plusieurs jours, on la poussera ainsi doucement et peu à peu à sa véritable place. Cette aiguille doit être ferme et repérée sur son canon pour entraîner sûrement la roue qui la porte, et même, pour sûreté, on doit former à toutes ces aiguilles un cran avec une goupille qu'il reçoit, ce qui sert de repère plus assuré. Lors-

qu'on fait sauter l'aiguille d'un quantième, il faut observer qu'il ne soit pas engagé dans son changement mécanique, et ne pas y toucher depuis neuf heures du soir jusqu'à trois heures du matin. Quelques-uns ne sont pas engagés si longtemps, mais cet intervalle réservé est plus sûr. On n'opère donc que dans le reste des vingt-quatre heures. Si, par négligence de remontage, le quantième saute à midi, il faut faire *rétrograder de préférence* les aiguilles d'heure et minute d'un tour entier ou de douze heures du cadran, et, si le quantième est alors en arrière de l'Almanach, on fait ensuite sauter son aiguille à son point.

1179. Nous avons dit ailleurs qu'une équation complète en pendule porte d'elle-même les différences des mois de 28, 29, 30 et 31, comprises dans les divisions de leurs mois; mais, quoique la roue annuelle y soit ordinairement d'un grand diamètre, les divisions y sont encore bien rapprochées, et deviendraient trop difficiles à distinguer dans le volume réduit à la Montre. Dans les cadratures annuelles de Pendules, il faut changer l'index de place pour le mois de février de l'année bissextile; ou bien il faut, pour être dégagé de tout soin à cet égard, avoir une équation bissextile compliquée d'une étoile quadriennale, qui corrige alors toutes les différences; mais cette complication est plus exigeante et plus dispendieuse en Montre. On peut donc aisément s'astreindre à soigner dans une Montre la correction mensuelle, pour avoir une équation plus simple et dont les effets sont d'autant plus assurés.

Du reste, l'équation ne doit s'accorder ici qu'avec la table moyenne entre deux bissextiles que l'on trouve à la fin du premier volume de ce Traité, et qui peut suffire à la plupart des amateurs.

1180. *Récapitulation.* On doit conclure de ce qui précède que la roue de 64 est à la même hauteur ou distance de la platine que la roue de 32 de minuterie qui la mène;

Que la roue de 31 des jours du mois passe au-dessus de celle de 64, dont la cheville *g* fait sauter une fois en 24 heures une dent de cette roue de 31;

Que la roue de 24, fixée en dessous à la roue de 31, se trouve à même hauteur que la roue de 48, avec laquelle elle engrène;

Que, le pignon de 10 de la roue de 48 menant la roue de 60 qui porte l'ellipse, celle-ci peut arriver à la même hauteur que la face du pignon de 10, laquelle dépasse d'autant la roue de 60.

1181. Lorsqu'on veut repérer tous les mobiles de cette cadrature, il faut d'abord faire arriver la partie la plus étroite de l'ellipse que l'on repérera sous le bras du râteau (comme époque du 11 février); alors l'aiguille de gauche de quantième du mois devra tomber sur la onzième division de son cadran, vers le repère de la roue de 24 avec celle de 48, et l'aiguille de droite pour le nom du mois sera posée en avant du mot *février* d'à peu près un tiers de sa distance à *mars*. C'est alors qu'on repérera la dent du râteau avec son pignon du centre, la dent de la roue de minuterie de 32 avec la roue de 64, le pignon de 10 avec la roue annuelle de 60, etc.

1182. La roue des heures de 32 faisant deux révolutions en 24 heures, la roue de 64

n'en fait qu'une par jour. La roue de 31 de quantième fait sa révolution en un mois, ainsi que sa petite roue de 24 fixée du dessous ; la roue de 48 fait un tour en deux mois, ainsi que son pignon de 10 ; d'où il suit que la roue de 60, menée par ce pignon de 10, fait sa révolution en six fois deux mois, ou en 360 jours ; et les trente et unièmes jours des mois qui portent ce nombre, moins les deux derniers jours de février, achèvent de faire durer la révolution annuelle pendant 365 jours.

1183. L'ellipse se trace d'abord sur une plaque mince d'essai, préparée en laiton, et un peu plus grande qu'il ne la faut à la fin. On substitue à la touche du bras, rapportée avec une vis et un pied, une autre touche percée d'un trou dont le centre correspond juste au point de contact qui aura lieu entre la vraie touche et l'ellipse d'acier. La fausse touche, fixée momentanément par la même vis, doit passer au-dessus de la fausse ellipse ; il faut aussi ajuster sur la boîte un faux cadran de laiton évidé, auquel on ne conserve qu'un 1/2 arc pour les minutes, correspondant à celui du vrai cadran ; on placera aussi les aiguilles du quantième des jours du mois, ainsi que celles d'équation et des minutes et heures, toutes à leurs repères, et l'on fera courir le rouage pour l'arrêter seulement de cinq en cinq jours ; on placera à chaque station l'aiguille de quantième sur la minute et sur sa fraction approximative, indiquées par la table moyenne d'équation, ce qui réglera la situation du bras du râteau ; avec un foret juste au trou de la fausse touche et à pointe bien centrée, on marquera un point sur la fausse ellipse de laiton, et les suivants, de cinq en cinq jours, pour achever le tour annuel. On découpera cette fausse ellipse suivant ces points, et elle servira de modèle pour l'ellipse d'acier, en faisant correspondre exactement les trous de vis et pieds qui auront servi à fixer l'une et l'autre sur la roue de 60. L'ellipse d'acier, laissée d'abord un peu trop grande, pourra être vérifiée et corrigée par une seconde opération faite avec la touche véritable qui doit appuyer dessus. Pour exécuter plus sûrement cette opération, qui est la plus exigeante de toutes celles de cette cadrature, on pourra relire avant et méditer ce que nous avons dit (752 et suiv.) sur la manière de tracer en grand l'ellipse d'une Pendule d'équation, afin de se pénétrer de l'esprit et des motifs des soins nécessaires, et pour en prendre seulement ce qui est applicable à la circonstance présente. On observera, par exemple, que, dans l'un et l'autre cas, il faut que le rouage ait son ressort moteur armé et en tirage sur les engrenages, comme aussi celui du râteau, de manière que les effets d'ébat des trous et des dentures soient compris dans les mesures ou points à marquer, etc.

1184. Il serait prudent aussi d'ébaucher et terminer d'abord plusieurs parties de cette cadrature en laiton, et d'en corriger au besoin les divers rapports pour se préparer ainsi à l'exécution définitive et au succès d'une manière plus certaine. Nous ne parlons pas ici du rouage de cette cadrature qui peut plus facilement être établie au premier coup, si les mobiles ont les justes dimensions expliquées ici provisoirement, comme par anticipation, pour obtenir de bons engrenages.

Quant à ces engrenages et tous les autres, le lecteur intelligent a dû reconnaître la voie de leurs proportions générales dans plusieurs passages de ce livre, notamment dans

nos définitions, à la page 105 de l'Introduction et ailleurs. Nous ne craindrons pas néanmoins de revenir ici en partie sur ce sujet trop communément négligé. Nous rappellerons donc que les excédants des dents des roues qui mènent deviennent plus longs et ont leurs ogives plus aiguës à mesure que les pignons menés sont plus nombrés; et que même avec le pignon de 16, qui porte ici l'aiguille d'équation, il faut déjà retrancher la pointe des dents pour en éviter l'accotement au fond des vides du pignon : car le point de menée ou de contact y est suppléé plutôt par celui de la dent suivante, qui arrive à toucher à la ligne des centres avant que la dent précédente ait mené jusqu'à sa pointe; cette pointe est donc inutile et peut être supprimée, carrément toutefois et sans changer le reste de la courbe de l'ogive. Au pignon de 12, avec des vides assez profonds, la pointe de la dent peut rester ou être légèrement *frisée;* elle devient absolument nécessaire au pignon de 10, et, à plus forte raison, à ceux au-dessous de ce nombre. On a déjà dit que les pignons menés, ou les roues menées, n'ont besoin, pour excédant, que d'un arrondi en demi-cercle, et que c'est ce qui produit la différence du diamètre *total* entre un mobile mené et un mobile menant, dont les diamètres *primitifs*, pris au-dessous de l'excédant, sont du reste toujours les mêmes, c'est-à-dire toujours dans le même rapport que les nombres. Mais si deux mobiles sont alternativement menés et menants, ils portent chacun leur ogive, qui opère et cesse d'opérer alternativement. Cette matière ne peut être complétement développée que dans son chapitre spécial, et avec figures en grand; mais ces principes généraux, et ce que nous en avons dit souvent par anticipation dans le cours de cet ouvrage, ont pu indiquer suffisamment d'avance la vraie méthode à des lecteurs disposés à réfléchir. (*Intelligenti pauca.*)

Les anciens calibres d'équation pour Montre, de *F. Berthoud* et autres auteurs du même temps, exigeaient beaucoup trop de hauteur. Plusieurs autres, plus modernes, ont été aussi très-épais, parce qu'ils étaient établis dans des cadratures déjà compliquées de divers effets; celles qui le sont moins sont d'ailleurs d'une difficulté qui exige beaucoup de main-d'œuvre soignée : nous en donnerons ailleurs quelques exemples, comme pour la figure 7 de notre planche XXI. Le calibre que nous venons de décrire peut, au contraire, être facilement établi dans une Montre simple de médiocre et raisonnable épaisseur, sans en élever sensiblement la bâte, et donner une exactitude bien suffisante pour l'usage civil, si l'on y observe toutes les attentions que nous y avons indiquées. On pourrait même en trouver aisément la place dans les cadratures de répétition moderne du calibre *Lépine* perfectionné, sans en augmenter l'épaisseur, vu la place restante sous le cadran; mais il faudrait distribuer autrement les mobiles de cette équation, en conservant leurs rapports essentiels. Du reste, par l'emploi du cercle de minutes pour l'aiguille concentrique d'équation, le cadran est encore moins chargé de divisions que celui de la figure 7 de la planche XXI, mentionnée ci-dessus.

1185. Mais la cadrature d'équation de cette même figure 7 a cela de plus simple et peut-être de plus exact, que l'aiguille d'équation n'y est point conduite par un engrenage, vu qu'une touche directe de l'axe de l'aiguille appuie seule sur la courbe

d'équation, sans l'intermédiaire d'un pignon au centre de l'aiguille, dont la menée exige des soins; dans ces diverses constructions, il faut toujours sous le cadran une suite de pignons et de roues calculées pour ralentir, au degré voulu, le mouvement transmis de la chaussée ou de quelque autre mobile à la roue annuelle. (Voy. à ce sujet le paragraphe (774), page 32 de la seconde partie de ce Traité.) Au total, la cadrature d'équation, que nous venons de décrire avec d'assez amples détails, nous paraît, comme nous l'avons dit, la plus moderne, d'une plus facile exécution, et, en mot, l'une des plus simples qui nous soient connues.

NOUVEAU COMPENSATEUR DE LA FORCE MOTRICE,

EN REMPLACEMENT AVANTAGEUX DE L'ANCIEN STACK-FREED D'ALLEMAGNE, ENTIÈREMENT PERDU;

PAR M. PESCHELOCHE, HORLOGER A ÉPERNAY (MARNE).

« Ce nouveau mécanisme a pour but de modérer et compenser les inégalités d'action des grands ressorts moteurs. On va voir par ce qui suit qu'il est très-simple, facile à exécuter et très-utile pour le réglage. En voici deux moyens, fig. 1 et 2, pl. XXX.

« Le rochet de barillet ordinaire du mouvement porte un canon ajusté librement et sans jeu dans un trou B, percé au *levier-bascule* CBA, sur lequel sont fixés en A le cliquet ordinaire et son ressort; ce levier, ajusté au rochet, produit l'effet d'un encliquetage de fusée qui retient celle-ci sur sa roue. (V. les fig. 1 et 2.)

« Le long bras BC du levier presse sur un *cylindre* fixé sur l'axe de la roue de minuterie C, fig. 2, où les pivots sont d'un plus fort diamètre que ceux ordinaires; cette pression opère l'équilibre entre le haut et le bas de la force motrice, ainsi que la réaction de la puissance du ressort sur elle-même, au moyen de l'appui propre du rochet sur son encliquetage porté par le bras mobile et plus court BA du levier; aussi faut-il qu'en appliquant ce moyen, le grand ressort, armé plus ou moins, ne puisse d'abord faire courir son rouage.

« Pour rendre ensuite au rouage la liberté de sa fonction, on soustrait une partie de la pression du levier sur la roue de minuterie, au moyen d'un ressort ordinaire de Montre contenu dans le petit barillet E, fig. 2; cette puissance élastique soutend un bout de chaîne FG, attachée au bras de levier G, dont le tirage diminue en partie la pression. Le petit barillet, dans ce cas, ayant infiniment peu de mouvement, son action pour soulager le frottement de la minuterie peut être considérée comme sensiblement constante et uniforme. Le ressort droit CH, fig. 1, et la vis excentrique I ont le même but.

« Le petit barillet porte avec lui son encliquetage d'armure simple et ordinaire; ainsi, pour donner au rouage du mouvement plus ou moins de force, suivant l'exigence de la pièce, on arme convenablement le faible ressort *auxiliaire* H ou E des deux figures, ou, si le mécanisme comporte une application de poids en place de ressorts, on y établit la puissance nécessaire pour l'effet voulu.

« Par le simple exposé de cette disposition, il est facile de concevoir que la force du grand ressort moteur est divisée en deux parties agissant incessamment ensemble ; que l'une fait mouvoir directement le rouage, tandis que l'autre le modère avec égalité, en modifiant proportionnellement ses irrégularités ; et qu'enfin, la résistance étant opposée à l'excès de la force motrice, cette résistance, toujours égale elle-même à l'intensité de sa cause productrice, règle en définitive la force transmise au rouage.

« Le petit ressort de barillet, que l'on peut nommer *ressort auxiliaire*, doit donc être armé convenablement par son encliquetage particulier, pour laisser au rouage la liberté et le degré convenable de force indiqué par l'expérience. Dans la figure 1, une chaîne sans fin tire sur une poulie fixée à la roue de renvoi en L ; mais, en place du ressort droit CH et de la poulie, on a substitué depuis l'effet plus doux et constant du barillet FE, fig. 2 ; la figure 1 n'est donc ici que pour éclaircir le sujet. »

L'auteur fait observer que la distance du centre de mouvement du levier, à son point d'action sur la roue de minuterie, doit être telle que la force motrice soit d'abord entièrement absorbée, et que ce n'est que la force convenablement modérée du petit ressort de barillet qui doit rendre au ressort moteur la partie nécessaire de son action principale ; que, si la réaction du levier modérateur n'absorbe, par exemple, que huit dixièmes de celle du grand ressort, il restera à celui-ci deux dixièmes de trop en force inégale non réglée ; et que, par conséquent, l'action du petit barillet ne doit laisser au grand ressort moteur que la force nécessaire pour conduire le rouage ; il ajoute que la régularité obtenue par ce moyen extrêmement simple est aussi également remarquable. Ce *principe neuf* en Pendules civiles peut s'appliquer à bien d'autres cas.

1186. Le fond de cette idée, qui nous paraît ingénieuse, consiste principalement dans l'emploi de l'excès même de la force du moteur pour lui faire *modérer lui-même sa propre action*. On conçoit, en effet, que l'action du levier sur le rouage, par la minuterie, dépend uniquement de l'appui du grand ressort contre son encliquetage, appui que l'on sait devoir être, proportion gardée des leviers et des frottements, parfaitement égal d'ailleurs à l'action du même ressort sur son rouage ; de même que l'on démontre en mécanique qu'une corde tendue entre deux points d'appui agit et tire autant sur l'un de ces points que sur l'autre. Ici l'effet de *pelotage* du ressort disparaît.

Nous ajouterons que cette invention porte encore un intérêt particulier relatif à l'histoire des premières inventions pour la mesure du temps, en ce qu'elle remplace avec assez de bonheur, et probablement avec plus de succès, l'ancienne invention allemande appelée *stack-freed*, dont la contruction a été perdue et dont il ne nous reste aujourd'hui que le nom. Il ne paraîtrait même pas que cette ancienne invention eût réussi, à en juger par le peu de notions vagues rapportées par d'anciens auteurs, qui disent seulement qu'il s'agissait d'une « courbe en forme de cœur, appliquée au premier mobile, et sur laquelle « appuyait un ressort droit, qui en retardait le mouvement dans le haut du ressort et le « facilitait dans le bas. » L'invention savante et assez difficile à trouver de la fusée, qui remplaça la précédente, semble autoriser à croire que la première invention plus ancienne était très-imparfaite.

Quant à l'idée de M. *Pescheloche*, elle a déjà pour elle l'expérience d'une assez grande quantité de Pendules de très-médiocre qualité, qu'elle parvient à régler suivant l'auteur, qui paraît très-véridique, et d'après la nature du principe annoncé, avec une exactitude des plus satisfaisantes pour l'usage civil, pourvu qu'il ne s'y trouve pas d'avance des causes matérielles d'arrêt, comme de faux engrenages et autres obstacles *directs* qu'il faut au moins faire disparaître. L'auteur a fait aussi l'application du même moyen à des Montres de poche. Mais, du reste, il n'a pas la prétention de proposer sa méthode comme tendant à produire une perfection absolue : il sait très-bien qu'elle reste sous la dépendance de frottements toujours un peu variables en eux-mêmes ; aussi n'a-t-il pas négligé dans son appareil des réservoirs suffisants pour que l'huile abonde toujours aux parties frottantes. Or, lorsqu'il ne s'agit que de régler des pièces à l'usage civil, on reconnaîtra aisément ici un avantage assez marqué si, comme le fait l'annonce, des variations d'un quart d'heure sur quinze jours de marche, dans les plus mauvaises pièces civiles à pendule court et léger, sont réduites à une ou deux minutes par le travail facile et prompt des mains les moins habiles.

L'auteur s'est assuré la propriété de son heureuse idée par un *brevet*, et les amateurs concevront de reste que c'est toujours à l'inventeur que l'on doit s'adresser de préférence, comme étant plus à portée de pratiquer les soins particuliers que lui ont indiqués naturellement les motifs, les moyens et l'expérience de sa propre invention (1).

1187. *Note de l'Éditeur.* On ne doit pas confondre la construction ci-dessus avec une autre publiée dans un petit ouvrage d'un homme de lettres qui n'est pas artiste ; il y propose, en remplacement de l'ancien *stack-freed*, un *limaçon* mené par le barillet et retenu, suivant lui, par la pression d'un ressort droit portant un rouleau, etc. Cette idée, qui pourrait séduire, aurait au contraire le défaut d'augmenter ici continûment la puissance du ressort moteur, par l'effet du plan incliné du limaçon ; car on voit, dans d'autres applications de ce genre, un limaçon, libre sur des pivots, céder à la pression d'un tel ressort, qui seul suffit à le faire reculer jusqu'au point de son court rayon, effet directement opposé à celui qu'il faudrait ici produire. L'auteur n'a pas essayé

(1) Une idée utile en pratique est souvent fertile en applications diverses. L'auteur du nouveau *compensateur* nous a communiqué, le 12 juin 1843, un autre emploi de son même levier, pour produire un *remontoir d'égalité*, qui paraît comparable sous quelques rapports avec celui de *le Bon*, remarqué dans son temps. Une dent *épicycloïdale* du levier de M. *Pescheloche* agit ici sur une aile unique de pignon, portée par un chariot susceptible d'un mouvement angulaire de quelques degrés, et centré sur l'axe de la roue de temps ; l'extrémité mobile du chariot sert de cage à une petite roue menant la vis sans fin d'un volant, et cette roue porte un pignon engrenant dans la denture de la roue de temps, comme un *mobile-satellite*. Une double détente du chariot le dégage à chaque demi-heure, afin qu'après avoir compensé il revienne à sa première place. La réaction de la force motrice sur le rochet du levier offre toujours ici le même exemple utile dans plusieurs cas, d'un *effet mécanique modéré par lui-même.* Mais pour développer davantage ce sujet, il faudrait des figures que nous pourrons donner plus loin.

son idée théorique qui aurait été démentie par l'expérience. Pour écrire sur un art, il faut, ainsi que nous l'avons dit ailleurs, en posséder également la pratique et la théorie, être en état d'en juger sainement, savoir choisir ses autorités, éviter l'exagération des éloges à l'égard de ceux que l'on n'est pas à portée d'apprécier, au lieu de se faire l'écho de la partie ignorante du public dont on flatte par calcul les préjugés ; autrement, quelques notions théoriques ne garantissent pas d'une juste critique ceux qui ne possèdent pas assez une matière dont le *technique* même ne s'acquiert bien que par l'expérience. Il suffira de remarquer ici que, dans certains *compteurs* à double aiguille de secondes, un moyen semblable à celui proposé ci-dessus produit précisément un effet contraire, ce qui réfute complétement cette fausse théorie.

Observations générales sur la force motrice dans l'Horlogerie.

1188. Les articles suivants ne concernent aucunement le nouveau *stack-freed,* dont nous avons d'abord entretenu le lecteur ; cette invention est destinée à corriger les pièces à l'usage civil, où elle paraît fort utile comme moyen pratique. Nous la croyons bien préférable à l'usage des *tours faibles* du ressort que l'on emploie si souvent, et où le collement des lames a lieu par de grandes surfaces qui laissent tant de prises à l'épaississement de l'huile ; tandis que dans la méthode de M. *Pescheloche* les divers états de l'huile n'influent que sur une superficie peu étendue, où elle est entretenue fluide au moyen de son réservoir, et peut être renouvelée au besoin sans démonter la pièce.

L'article qui va suivre ne concerne donc que la question générale des forces mouvantes relativement à la haute Horlogerie, dite *de précision,* dont on ne veut borner ni la dépense, ni les soins, ni l'emploi du temps si facilement absorbé par des précautions scrupuleuses.

1189. On a dû remarquer, dans le cours de cet ouvrage, que toute machine destinée à mesurer rigoureusement le temps se compose d'abord de trois parties principales : 1° d'une puissance ou force motrice physique et constante, cause première et générale de tout mouvement; 2° d'une transmission de cette force au moyen d'un rouage et d'engrenages établis suivant des principes géométriques, puisés eux-mêmes dans la nature du mouvement et dans les propriétés des courbes qui en garantissent l'uniformité; 3° d'un échappement propre à retarder l'écoulement du rouage, au moyen d'un modérateur qui divise également les petites parties de la durée. Nous avons dit ailleurs que les premières tentatives de l'art ne durent quelques succès grossiers qu'à l'intelligence naturelle encore peu développée; que le temps et l'étude ont seuls permis d'analyser des phénomènes bruts en quelque sorte, dont une expérience bornée profitait sans en connaître les causes prochaines, ni les effets divers, ni les anomalies; qu'enfin la découverte des lois du pendule et de la chute des corps par le célèbre *Galilée*, que le savant *Huyghens* eût été bien capable de trouver s'il fût né plus tôt, mais qu'il appliqua si habilement, ébauchèrent la science de l'Horlogerie et donnèrent à l'art une nouvelle face. *Roemer* et d'autres géomètres trouvèrent les proportions du rouage et la figure des dentures, va-

riables suivant le nombre des pignons ; la physique mathématique découvrit dans le principe de la *gravitation* la cause première des oscillations du pendule, comme aussi la propriété d'inertie et de mouvement acquis du balancier rond et équilibré, dans ses vibrations réglées par l'élasticité du ressort spiral : ainsi la cause physique de la pesanteur des corps a fourni d'abord la puissance motrice la plus simple et la plus constante donnée par la *nature*.

1190. Le poids moteur de l'Horloge a donc un effet régulier et constant pour les machines fixes; mais, pour les instruments transportables, ce fut le génie du mécanicien qui employa la force élastique du ressort, nécessairement inégale suivant une progression croissante dans sa tension et décroissante dans sa réaction : tandis que celle du poids est sensiblement égale naturellement, dans le peu d'espace ou de descente modérée et lente que l'art lui fait parcourir ; elle s'y trouve même alternativement libre et suspendue à chaque vibration, ce qui prévient l'accélération d'une descente continue.

1191. Quand nous concevons la force naturelle du poids comme égale et constante, nous n'entendons nullement contredire une notion évidente de physique relative à la pesanteur ou *gravitation*, suivant laquelle tout corps pesant éprouve dans sa tendance à se rapprocher du centre de la terre une augmentation réelle de force, à mesure qu'il est plus près de ce centre ; en sorte que le poids de l'Horloge, au bas de sa descente, pèse mathématiquement plus que dans le haut, puisque, étant plus près du centre, sa gravitation y est véritablement augmentée. Mais la différence de 5 à 6 pieds et même plus, dans l'éloignement du centre de la terre, comparée au rayon terrestre de 1,500 lieues, devient un de ces *infiniment petits* dont on ne peut tenir compte en Horlogerie, où leur influence échappe à nos expériences les plus délicates. La corde qui se déroule du cylindre d'un régulateur, et qui s'ajoute peu à peu à la pesanteur du poids moteur, l'augmente bien plus sensiblement, et cette différence n'est presque jamais aperçue dans l'étendue des oscillations. Si elle pouvait l'être, il existerait aussi des moyens d'en contrebalancer l'effet, comme nous le dirons ailleurs, l'ayant nous-même pratiqué dans des cas excessivement susceptibles.

Quant à l'action inégale de l'élasticité du ressort du barillet, nous avons été autorisé dans ce que nous avons dit sur l'ancien *stack-freed* allemand par un passage de *Pierre Leroy*, rapporté par *Berthoud* : « On s'aperçut bientôt, dit-il, que l'action du ressort, « plus grande dans le haut de sa tension que sur la fin, produisait de grandes varia- « tions dans la Montre ; on y remédia par une mécanique appelée stack-freed, c'est-à-dire « par une espèce de courbe au moyen de laquelle le grand ressort de barillet remontait « un ressort droit qui s'opposait à l'action du barillet, lorsque le premier était dans le « haut de la bande, et l'augmentait, au contraire, lorsque ce même ressort du barillet, « étant vers le bas, agissait plus faiblement. » Ce fut donc un tel moyen, annoncé du reste aussi vaguement, faute sans doute d'une tradition plus explicite, qui précéda l'invention de la fusée, « l'une des plus belles de l'esprit humain, » selon l'expression de notre auteur. C'est à ce peu de mots extraits des *Étrennes chronométriques* de Pierre Leroy, de 1764, que se borne tout ce que l'on a pu savoir de cet ancien stack-freed, trop peu

expliqué, perdu même aujourd'hui, et que *Berthoud* croit avoir été imaginé par les Allemands, nation industrieuse à qui l'Europe est redevable des premiers essais de l'Horlogerie.

1192. L'invention postérieure de la fusée, d'un auteur inconnu (1), est sans contredit ingénieuse et savante; mais elle exige un égalissage parfait avec l'action du ressort, même de chaque ressort nouveau, quand l'ancien vient à se rompre; opération qui, trop renouvelée, détruit aisément la fusée. D'ailleurs, celle-ci ne fait pas marcher le mouvement pendant le remontage, à moins d'y adjoindre une autre invention moderne appelée *ressort auxiliaire*, accompagnée d'un second rochet avec son encliquetage particulier; mais ce ressort auxiliaire, tel qu'on le pratique communément, ne remplit pas toujours exactement sa fonction et est sujet à *gripper*. Enfin, l'emploi de la fusée expose à la rupture de sa chaîne, à celle de son encliquetage souvent trop faible, même à celle du ressort moteur, laquelle a lieu d'autant plus aisément qu'il faut aussi tenir ce ressort plus épais, etc. On voit donc que cette invention, toute précieuse qu'elle a paru d'abord, a aussi ses inconvénients. Mais on est forcé d'y avoir recours dans toutes les pièces communes dont l'échappement est trop sensible aux inégalités de la force motrice. Les Anglais conservent la fusée jusque dans leurs Pendules ordinaires où, pour avoir la place de ce mobile, ils préfèrent supprimer la sonnerie, à laquelle ils reprochent l'incertitude de la demi-heure pendant la nuit, etc. On emploie aussi la fusée dans les pièces où un tirage égal devient important, dans les Montres marines où l'on craint de n'avoir pas assez d'isochronisme, etc.

1193. Cet aperçu succinct démontre assez que, dans une Horloge fixe, la force motrice du ressort, variable elle-même par la température, ne vaut pas la puissance aussi naturelle, mais plus égale de la pesanteur, outre qu'il est plus simple et plus facile d'employer un poids, au moyen d'une corde enroulée sur un tambour ou cylindre, ce qui occasionne moins de travail et comporte un résultat plus assuré. Cependant, quand il s'agit de précision, rien n'est à négliger, et les dispositions les plus simples exigent également les plus grands soins; car, pour un régulateur astronomique, l'usage si simple du poids demande encore bien des attentions.

Le poids employé comme moteur doit donc agir sur le premier mobile du rouage avec l'indépendance la plus complète, car cette puissance pure et assez constante est trop précieuse pour en rien perdre. Lorsque l'espace pour la descente le permet, le poids à corde simple est préférable à celui dit *mouflé*, parce qu'on en évite le frottement sur deux pivots de la poulie et le pli de la corde, dont la résistance est également variable aussi par les effets de température et d'hygrométrie. Les cylindres soignés sont assez souvent cannelés en vis; mais nous estimons qu'un cylindre uni serait préférable (vu que l'on est plus certain de l'égalité de son diamètre) si l'on avait l'attention de donner à son axe une légère pente, propre à faire éloigner naturellement les tours de corde entre

(1) La fusée, très-ancienne aussi, pourrait bien avoir été imaginée par quelque savant artiste de Nuremberg, où furent composées les premières Pendules à mouvements célestes, et où l'on a employé, suivant *Janvier*, les premiers rouages satellites, etc.

eux, et d'une faible quantité. La corde à boyau que l'on y emploie souvent, susceptible de se détordre par les changements de l'atmosphère, pourrait aisément altérer les petites distances des tours dont nous parlons, mais une ganse ronde de soie, tissue et non torse, nous semble plus à propos ; on trouve des ganses anglaises de ce genre parfaitement conservées, même après un siècle de service, le temps ne paraissant en avoir altéré que la couleur ; elles sont bien plus flexibles que la corde à boyau.

Avec le poids simple ci-dessus, et pour suppléer à son action pendant le remontage, il faut nécessairement un ressort auxiliaire. Nous en donnerons, dans son lieu, une disposition propre à ne jamais *gripper* ni manquer son effet dans la Pendule à poids ; nous en décrirons aussi une autre où les frottements pendant le remontage ont lieu sur d'autres surfaces que celles employées par la machine diurne. Nous avons eu occasion de constater que le frottement du remontage sur les mêmes pivots ou tourillons, se trouvant forcément dirigé en sens contraire de celui de la marche diurne, peut changer pendant quelques temps l'étendue des arcs dans des instruments délicats ; et, lorsqu'il s'agit de précision, nous avons déjà dit qu'il faut savoir écouter les scrupules, sauf à les apprécier toutefois comme il convient.

1195. C'est encore ici le cas d'appliquer à la force motrice la disposition aussi heureuse que simple pratiquée par *Julien* dans les grosses Horloges, et qui convient encore parfaitement aux pièces les plus délicates, lorsque la distribution des mobiles le permet. Nous avons déjà parlé de cette méthode (914) qui consiste à établir le tirage du poids moteur, du côté de l'engrenage de la roue du cylindre avec le premier pignon ; on a vu, dans les articles concernant les *leviers*, le soulagement notable qui en résulte, par la réduction considérable du frottement des pivots. On peut obtenir facilement cet avantage dans les Horloges astronomiques, en plaçant l'axe de la deuxième roue, dite *de temps* et portant le premier pignon, sur la même ligne horizontale que l'axe du cylindre du poids; cette deuxième roue engrène ensuite avec le pignon de minutes, dont l'axe peut aisément être ramené vers le milieu de la pièce, si la disposition du cadran l'exige, etc. Dans quelques pièces marines, on établit ainsi avantageusement le tirage de la chaîne sur la fusée, c'est-à-dire sur le côté de l'engrenage de sa roue avec le pignon du centre. Et dans les Montres ordinaires de poche à chaîne et à fusée, on pourrait avec de légers changements, profiter de cette même disposition avantageuse, si simple et si bien trouvée.

1196. On sait que la force motrice tirée directement du ressort des barillets dentés dans les Pendules, et aujourd'hui dans la plupart des Montres modernes à cylindre, donne une grande différence dans la force du tirage, entre le haut et le bas du ressort, inconvénient inséparable de la nature de cet agent, auquel on n'a pu remédier, dans certains genres de pièces, que par l'emploi de la fusée. Cette difficulté disparaît en partie dans les pièces fixes à l'usage civil, dont le pendule est long et la lentille pesante, ainsi que dans les Montres à cylindre où les frottements de l'échappement compensent à peu près l'inégalité de force du ressort moteur. C'est ici tout l'opposé, comme nous l'avons dit ailleurs, de l'opinion formelle de *Ferdinand Berthoud*, qui s'était d'abord prévenu si mal

à propos contre le cylindre, et qui en outre a prétendu et publié que nul échappement ne pouvait corriger les inégalités de la force motrice, ni produire l'isochronisme approché du régulateur. Il n'en a pas moins proposé une *ancre isochrone* et mis à l'une de ses meilleures pièces marines un échappement à cylindre ; il a enfin muni toutes ses dernières Montres de ce même échappement. Nous avons déjà signalé quelques-unes des nombreuses variantes et contradictions de cet auteur, habile artiste d'ailleurs, et surtout pour son temps, mais dont les ouvrages ne doivent être lus qu'avec précaution. Bien des gens qui n'ont que son *essai*, vieilli de 80 ans, n'en connaissent pas le supplément, et bien moins encore les 5 à 6 autres derniers volumes de ses œuvres, où il contredit souvent les premiers. Ce n'est pas qu'il n'y ait beaucoup d'observations justes dans *Berthoud*, mais il y faut des lecteurs en état de distinguer le vrai d'avec le faux, au moyen d'une instruction et d'une expérience plus complètes : cependant, malgré ses erreurs, *Berthoud*, pour qui saura le juger, aura toujours un mérite recommandable par ses longues recherches et ses nombreux travaux.

1197. Quant à la force motrice du ressort du barillet denté, on avait essayé dans les derniers temps un moyen de correction tiré de l'inégalité de force des divers tours de lame. Un très-habile fabricant de ressorts, M. *Vincent*, à qui on attribue cette tentative, imagina, dit-on, le premier, de tenir plus faibles les tours du dehors, comparativement à ceux du centre, afin que, ceux-ci n'étant pas encore totalement rapprochés du centre après le remontage, ceux du dehors se ployant plus facilement formassent une espèce d'anneau de plusieurs cercles, dont ceux du milieu du barillet eussent à surmonter l'adhérence, en se déployant pendant la marche de la pièce. Mais ce moyen adroit, destiné à compenser en partie l'inégalité du tirage dans les pièces à l'usage civil, ne pouvait convenir à celles de précision, ce que l'auteur paraît n'avoir pas assez considéré ; il s'y trouve encore un autre inconvénient, c'est qu'immédiatement après le remontage, les tours du centre non serrés agissent d'abord sur la marche avec toute leur force, et ce n'est qu'après quelques heures de développement que celui-ci se trouve modéré par le cercle ou espèce d'anneau formé sur les premiers tours intérieurs plus forts, par les tours faibles du dehors. Ainsi, par là, cette correction est encore incomplète.

1198. Cette modification fut d'abord adoptée pendant quelque temps par un artiste très-connu et qui, fort habile à ajouter aux inventions qu'il rencontrait les perfectionnements qui leur manquaient, ne perfectionna pourtant pas celle-ci. Nous ignorions ce procédé, lorsque la circonstance suivante nous le fit connaître. Nous avions pour notre usage une pièce marine de poche à échappement libre, qui rebattait facilement par les secousses continues d'une longue marche à pied. La disposition de l'échappement était très-bizarre et défectueuse, et telle enfin que, sans la détailler ici, elle se trouvait sujette à une sorte d'accrochement accidentel, qui ne pouvait être dégagé qu'en levant le coq et l'ancre. En conférant un jour avec l'artiste sur ces inconvénients majeurs, il fallut, pour dégager l'échappement alors accroché, introduire à l'ordinaire un équarrissoir dans le rouage pour l'empêcher de défiler, vu que le ressort moteur se trouvait

encore armé aux deux tiers : après diverses observations, il fallut remettre l'échappement en place ; lorsqu'on reprit en main le mouvement resté sur l'établi, l'équarrissoir tomba du rouage, sans que celui-ci défilât, suivant sa tendance naturelle. Surpris de cet effet, nous eûmes, nous, la première pensée qu'il existait quelque faux engrenage qui arrêtait le rouage, mais l'artiste nous rassura à cet égard, en nous expliquant le *mystère* des tours faibles du ressort. Cet effet ne pouvait, à la vérité, dans les cas ordinaires, suspendre totalement l'action de la force motrice, tant que la Montre marchait ; mais cette fois, le rouage étant resté longtemps arrêté fermement, les tours du dehors du ressort avaient eu le temps de se coller peu à peu entre eux assez complétement pour contre-balancer tout l'effort des tours du centre, et la force motrice ne tirait plus. Le moindre ébranlement donné à l'un des mobiles avait ensuite suffi pour rompre cet équilibre accidentel. Nous fûmes encore plus mécontent de cette méthode, qui plaçait ainsi la force motrice d'un chronomètre sous l'influence des frottements et de l'état de l'huile, que nous ne l'avions été d'abord de l'idée de quelque faux engrenage dans une pièce assez soignée du reste, et nous critiquâmes fortement ce procédé. Aussi notre première attention fut-elle de faire exécuter au même M. *Vincent* plusieurs ressorts semblables pour le barillet de cette pièce. Ces ressorts étaient diminués à l'ordinaire en fouet, comme pour fusée, avec l'attention de ne leur donner que le degré de diminution de force nécessaire pour que les tours restassent détachés entre eux pendant la marche diurne. Nous fîmes choix du ressort que les hasards de la matière et de la trempe firent le mieux réussir sous ce rapport ; il s'en trouva un dont les tours étaient assez régulièrement détachés, et dont la force au bas de la marche ne se réduisait que d'environ un tiers de celle du haut d'armure. Ne pouvant espérer d'obtenir davantage, nous laissâmes à l'isochronisme assez approché du spiral la correction de la différence de durée des diverses étendues d'arc, ce qui réussit d'une manière très-satisfaisante. Nous étant éloigné peu de temps après de l'artiste, avec qui nous restâmes en correspondance suivie, il nous écrivit bientôt ces propres mots : « Je fais exécuter maintenant mes ressorts de barillet denté suivant votre méthode, et je m'en trouve bien. » Nous avons communiqué cette observation aux membres de la société chronométrique de Paris, et à un habile artiste qui en fait partie (M. *H. Robert*, lequel, ayant traité avec analyse la question du barillet denté, l'emploie avec succès dans ses pièces marines), et ils nous ont paru approuver aussi cette méthode.

Cependant la pièce que nous venons de citer ayant encore dans son mécanisme d'autres singularités qui en rendaient l'usage incommode et parfois inexact, nous fûmes obligé de renoncer à son usage, et de la remettre à son auteur. C'est la seconde pièce de ce genre que nous avons été forcé d'abandonner : car précédemment un autre chronomètre que nous tenions d'un autre artiste avait une marche assez régulière, pourvu qu'il fût maintenu vertical, midi en haut ; mais pour peu qu'il fût incliné, comme 1 heure, ou 11 heures en haut, les variations étaient telles, qu'on ne pouvait compter sur des indications beaucoup plus inexactes que le genre ne le comporte. Le défaut de celui-ci provenait du manque d'équilibre du balancier, équilibre altéré exprès, et mal à propos,

pour en abréger le réglage. Il fallut aussi le remettre à son auteur, qui préféra de le reprendre plutôt que d'en corriger le défaut.

1199. La puissance motrice du ressort diminue, comme on sait, à mesure que les tours de lame, appliqués d'abord sur l'arbre par le remontage, se déroulent en se portant successivement les uns sur les autres contre l'intérieur de la virole du barillet. Lorsque le ressort est au bas de son tirage, il agit comme un levier, qui prend son point d'appui sur le crochet de l'arbre ; l'action de la puissance a lieu sur la longueur d'un rayon tiré du centre ; elle est appliquée alors vers le dernier tour le plus intérieur de ceux collés contre la virole : la puissance doit donc être considérée ici comme agissant uniquement sur ce point ; la résistance à vaincre, ou le point à mouvoir, est celui du contact de l'engrenage, placé au bout du prolongement du même rayon jusqu'à la denture ; ainsi la puissance est appliquée ici à un levier de la deuxième espèce, c'est-à-dire qu'elle est entre le point d'appui et l'obstacle à surmonter et peu avantageuse, étant vers la moitié du rayon total du barillet. Lorsque le ressort est armé tout en haut, le point d'appui se trouve toujours sur l'œil-de l'arbre, surtout si les tours du centre ne sont point collés, mais la puissance agit sur le crochet de la virole du barillet ou plutôt sur la barrette qui le garantit, et ainsi plus près de l'obstacle de la denture ; sa position est moins désavantageuse : aussi la force y augmente, joint à ce que les lames du ressort plus courbées réagissent davantage. Tout concourt ici à augmenter la puissance par l'armure du ressort. C'est à peu près ainsi qu'il nous semble qu'on peut analyser l'action du ressort dans ses deux extrêmes. Une analyse d'un autre genre sur le *développement* des tours de lames expliquerait aussi comment il arrive qu'un ressort, remplissant à très-peu près la moitié du vide du barillet entre le noyau de l'arbre et la virole, donne plus de tours de tirage ou de développement que quand il ne remplit pas cette moitié, parce qu'alors il est trop court, ou que même quand il remplit plus que la moitié, bien qu'alors il soit plus long, etc.

1200. Ces réflexions, et d'autres analogues, sont principalement à l'usage de ceux qui entreprennent des constructions nouvelles, des dispositions tendant à quelque avantage pour la mesure du temps. Elles ne sont pas inutiles non plus à ceux qui se bornent à bien copier de bons ouvrages, partie dont le succès ne laisse pas d'avoir son mérite et son utilité. Mais, pour se livrer au perfectionnement de la haute Horlogerie, il faut être mécanicien délicat et scrupuleux, avoir une suffisante connaissance, pratique au moins, de physique et de géométrie. C'est alors que l'Horlogerie devient à la fois une *science* et un *art libéral*.

1201. Nous avons vu ailleurs que la *gnomonique* est nécessaire à l'artiste éloigné des villes capitales; car, dans bien des lieux, le mécanicien, le physicien, le géomètre, en un mot, l'homme de génie du pays, y paraît être Horloger; c'est à lui que sont adressées les questions que ne peuvent résoudre ceux qui sont livrés aux professions vulgaires, de même que ceux qui ne connaissent que le *dédale des affaires*. L'usage du baromètre, par exemple, y manque souvent d'ouvriers ou de praticiens pour la réparation de cet instrument; et comme celui dont il s'agit porte un cadran, des aiguilles, des poids, une poulie, on en conclut assez généralement que c'est un travail d'Horlogerie, ou du moins dans les

attributions de l'Horloger. Si celui-ci ignore les effets de l'air, du vide dans l'intérieur du tube, enfin les causes physiques des indications de l'instrument, il ne peut le rétablir, et passe pour ignorant dans l'esprit des habitants, qui le sont souvent encore plus que lui. *Berthoud* lui-même a senti la nécessité de cette instruction pour les Horlogers, et en a introduit un assez long article dans son *Essai*. Nous qui recommandons aux élèves l'instruction physique et mathématique pour leurs progrès en Horlogerie, et qui rapportons autant que possible ce que les anciens auteurs contiennent de plus utile, nous recueillerons aussi cet article de *Berthoud*, que nous accompagnerons de quelques développements ultérieurs. Il ne faut pas oublier ce que nous avons dit de *Graham*, qui a dirigé et exécuté lui-même de bons instruments d'astronomie ; qui le premier appliqua le mercure à la compensation du pendule, etc., etc., en obtenant l'estime générale de ses contemporains par ses connaissances et son esprit solide, joints à la modestie et à l'impartialité à l'égard des productions des *autres artistes*.

Des baromètres et thermomètres avec cadran et aiguilles, d'après F. Berthoud.

1202. « Quoique les baromètres et les thermomètres n'entrent que comme accessoire ou ornement dans les Pendules, nous avons cru, dit *Berthoud*, que beaucoup de personnes seraient curieuses de savoir le mécanisme des baromètres et des thermomètres à aiguilles dont on fait actuellement usage, et comment on doit les exécuter : c'est par cette raison que nous en parlons ici.

« Le baromètre est un instrument qui sert à indiquer la pesanteur et l'élasticité de l'air. *Torricelli* est l'inventeur du baromètre simple ; c'est un tube de verre d'environ 36 pouces de longueur, ouvert par l'extrémité inférieure et fermé hermétiquement par la supérieure ; on le remplit de mercure par son ouverture, puis on le renverse, de sorte que cette ouverture soit plongée dans un vase où il y ait assez de mercure pour la recouvrir ; ou bien le tube est recourbé et évasé en forme de fiole du côté de l'ouverture, afin qu'étant rempli de mercure, puis renversé, de sorte que, restant perpendiculaire à l'horizon, l'extrémité bouchée étant placée en haut, le mercure qui reste dans la fiole fasse le même effet que le vase dont on vient de parler. (*Phrase inexacte, mais concevable.*)

« La hauteur moyenne de la colonne du mercure qui reste suspendue dans le tuyau ou *tube*, comptée depuis son sommet jusqu'au niveau du mercure qui reste dans le vase ou dans la fiole, est à Paris de 27 pouces 9 lignes environ. Cette hauteur varie selon l'élévation des lieux : par exemple, sur le bord de la mer, elle est de 28 pouces, et elle devient d'autant plus petite que l'on est plus élevé au-dessus du niveau de la mer ; sur les hautes montagnes, comme les Alpes et les Pyrénées, elle n'est que de 18 à 19 pouces. Dans un même lieu, le mercure monte et baisse selon les variations de l'atmosphère, c'est-à-dire selon que l'air est plus ou moins chargé de vapeurs, selon les vents, etc. C'est cette propriété du baromètre qui sert à prévoir le beau temps et la pluie, usage ordinaire du baromètre (*cette interprétation est souvent trompeuse*).

« Le tube doit être assez long pour que la colonne de mercure *en équilibre* n'abou-

tisse *pas* au bout qui est fermé; il doit y rester un intervalle aussi parfaitement purgé d'air qu'il est possible, sans quoi la colonne de mercure se tiendrait d'autant moins haute et les variations de l'atmosphère seraient marquées d'autant moins régulièrement qu'il y aurait plus d'air contenu dans cet espace.

« Le vase ou la fiole qui est au bout inférieur du tube doit avoir un diamètre environ dix fois plus grand que celui du tube; c'est sur la surface du mercure que contient ce vase ou bouteille que l'atmosphère fait une pression dont la quantité détermine la hauteur de la colonne suspendue.

« Pour rendre plus sensibles les variations du baromètre, les physiciens en ont construit différentes sortes, afin de pouvoir estimer le moindre changement qui arrive dans l'air. Nous nous contenterons de rapporter celui dont l'invention est attribuée au docteur *Hoock*, renvoyant ceux qui désireront s'instruire de cet objet aux ouvrages de *Musschembrock*, où cet excellent physicien a traité fort au long de ce qui concerne le baromètre et les causes de ses variations; on peut aussi consulter le docteur *Desaguiliers*.

« A B C (pl. XXX, fig. 3) représente le tube de ce baromètre à cadran et à aiguille; ce tube recourbé par en bas porte le cylindre C, de même grosseur que le cylindre supérieur A : la longueur totale de ce tube est de 36 pouces. Le diamètre des cylindres doit être d'environ 5 lignes, celui du tube de trois lignes; par ce moyen, on réduit beaucoup les frottements que cause le mouvement du mercure contre les parois du tube : ainsi le moindre changement dans l'air fait monter ou descendre le mercure, surtout si l'espace qui reste au-dessus du mercure dans le cylindre supérieur est bien vide d'air, et que le mercure soit bien pur.

« Lorsque le baromètre ordinaire parcourt deux pouces, celui-ci n'en parcourt que la moitié; car les deux cylindres étant de même grosseur, il arrive que, lorsque le mercure contenu dans le cylindre inférieur descend d'un pouce, le mercure contenu dans le cylindre supérieur monte d'un pouce; et comme la hauteur de la colonne se mesure depuis la surface du mercure du tube inférieur, la colonne est devenue par ce changement de deux pouces plus grande qu'elle n'était, quoiqu'elle n'ait parcouru qu'un pouce par chaque bout : si donc on plaçait une échelle à côté d'un des cylindres, il faudrait qu'elle fût graduée par des divisions ou parties moitié plus petites que celles du baromètre ordinaire; mais on n'emploie ce tube de baromètre que pour faire mouvoir une aiguille fort grande, qui augmente considérablement l'espace parcouru, et rend sensible le moindre changement ou mouvement du mercure.

« Pour cet effet, on fait poser sur la surface du mercure du cylindre inférieur un petit poids *e* fait de bois de *fer* ou d'ébène, dont le poids est d'environ 36 grains : ce poids est attaché à un bout d'un fil de soie, dont l'autre bout tient à une poulie D à deux rainures vue en plan, figure 3, et en profil, figure 6; l'autre bout de ce fil est attaché à la rainure sur laquelle il s'enveloppe. La seconde rainure de cette poulie porte un fil pareillement attaché à un trou percé au fond de la rainure; l'autre bout de ce fil porte un contrepoids *f*, dont la pesanteur doit être moitié du poids qui pose sur le mercure : c'est-à-dire de 18 grains lorsque le poids est de 36.

« La poulie est fixée sur un axe ou tige qui porte deux pivots, dont l'un roule et est saillant (*en dehors*) dans une plaque qui porte un cadran ; tel que celui figure 5 : ce pivot prolongé porte une aiguille semblable à celle de la figure 5 ; l'autre pivot de l'axe de la poulie roule dans un trou fait à un pont, ce qui forme une cage à cette poulie.

« La circonférence du fond de la rainure de la poulie doit être exactement d'un pouce et demi, pied de roi ; pour l'exécuter juste de cette grandeur, il faut faire un nœud à un fil ou soie de la grosseur que l'on doit employer pour porter les poids; on coupera le fil au-dessus du nœud, en sorte qu'il ait exactement un pouce et demi de longueur; on diminuera la rainure de la poulie, jusqu'à ce que le bout du fil se joigne au nœud : par ce moyen, si l'on divise le cadran en trois parties, chacune correspondra aux divisions du baromètre ordinaire ; car, tandis que le baromètre ordinaire parcourt trois pouces, celui à aiguille parcourra tout le cercle du cadran, c'est-à-dire que l'aiguille fera une révolution.

« Ainsi, en marquant sur le cadran 26, 27, 28 et 29 pouces ; si, lorsque le baromètre ordinaire est sur 28 pouces, on *place* l'aiguille sur les 28 pouces du cadran, quand le baromètre ordinaire marquera 27 pouces, l'aiguille de celui à *cadran* sera sur les 27 pouces de *celui-ci*. On peut diviser l'intervalle entre chaque pouce du cadran en 12 parties qui représentent des lignes; et si ce cadran a, je suppose, 8 pouces de diamètre ou environ 24 de circonférence, on pourra encore subdiviser l'intervalle entre chaque partie qui représente les lignes en 12 autres parties qui représenteront des douzièmes de ligne.

« On place ordinairement, à Paris, sur le 28e pouce du baromètre, le temps variable ; on peut le placer de même sur le cadran, et ainsi des autres époques de la pluie et du beau temps : comme sur le baromètre commun. Comme on peut aussi placer une *seconde* aiguille ou index qui tourne à frottement, que l'on fera tourner à la main, et qu'on placera à la même division où est actuellement l'autre aiguille, de cette manière on saura combien le baromètre varie d'un instant à l'autre.

« La partie *percée* et saillante *g* du tube sert à le remplir; pour cet effet on renverse le tube de haut en bas, et au moyen d'un entonnoir de verre, en versant le mercure bien pur, il descend et remplit le cylindre et en chasse l'air ; mais, pour mieux purifier le mercure, il faut le faire chauffer, et introduire dans le tube un petit fil de fer qui descende jusqu'au fond du cylindre ; à mesure que le mercure s'échauffera, on fera tourner le fil de fer, ce qui fera sortir l'air du tube. On fera ainsi bouillir le mercure jusqu'en *a*, alors on mettra du mercure en remplissant le tube jusqu'en *g;* mais il faut avoir attention de ne pas introduire de mercure *froid* pendant que le tube et le mercure qu'il contient sont chauds, le *premier* ferait casser le tube : ensuite on scellera la partie *g* dont on s'est servi pour introduire le mercure. On peut se contenter de faire entrer un petit bouchon de liége dans cet orifice, et de le sceller avec de bonne cire d'Espagne ; mais le mieux est de le sceller à la lampe avec un chalumeau, parce que le verre, en se fondant, bouchera l'ouverture *g*.

« Cela étant fait, on renversera le tube; et pour lors le mercure contenu dans le tube supérieur descendra, et la colonne se mettra en équilibre avec l'atmosphère. Si le mercure descend trop bas dans le tube, on en fera entrer du nouveau par le cylindre infé-

rieur; afin que le mercure se trouve placé à peu près dans le milieu de la longueur des cylindres, comme on le voit en *c*C, fig. 3.» (NOTA. *Nous avons mis en italiques les principales corrections de cet article, pour ne pas altérer le texte de Berthoud.*)

Du thermomètre à mercure avec aiguille.

1203. La fig. 5, pl. XXX, représente, ajoute *Ferdinand Berthoud*, un « thermomètre à aiguille et cadran, que je composai en 1756. Le mécanisme est le même que celui du baromètre; mais le tube diffère de celui des thermomètres ordinaires, en ce qu'il est ouvert pour y introduire un petit poids qui pose sur le mercure. *Les bouts d, d, sont fermés.*

« Le tube ou cylindre de ce thermomètre a trois lignes de diamètre, il est rempli de mercure depuis *b* jusqu'en *a a;* le surplus des turbes recourbés est rempli d'esprit-de-vin, dont la dilatation est plus grande que celle du mercure : j'ai donné cette forme aux tubes afin de rendre le thermomètre plus sensible aux moindres changements de l'air, et j'ai donné par ce moyen plus de surface. On voit que l'air étant plus froid le mercure descend ainsi que le poids, ce qui fait tourner la poulie et l'aiguille que son axe prolongé porte.

« Cette aiguille marque sur le cadran BC les degrés de température, de la même manière que le mercure ou l'esprit-de-vin du thermomètre ordinaire le fait sur une échelle graduée.

« Ce cadran est divisé en 90 parties ou divisions, que je fais correspondre au thermomètre de M. *de Réaumur;* pour cet effet, lorsque le tube *aab* est rempli de mercure, et les cylindres recourbés *a, d, d,* d'esprit-de-vin, je les plonge dans la glace pilée, et, après les y avoir laissés assez de temps pour que le mercure et l'esprit-de-vin soient au terme de la glace, je marque sur le tube le point *b* où le mercure s'arrête; je me sers pour cela d'un fil qui enveloppe le tube, et que je fais monter et descendre jusqu'à ce qu'il soit arrêté parfaitement au point où est la surface du mercure; ensuite je place ce tube à côté d'un bon thermomètre gradué selon les divisions de M. *de Réaumur;* je place l'un et l'autre dans un lieu où la température soit d'environ 12 à 15 degrés au-dessus de la glace; je marque alors, comme pour la glace, et par le même moyen, le point où le mercure y monte (je suppose cet intervalle de 6 lignes); je fais la proportion et dis : si, pour 15 degrés parcourus par le thermomètre, le mercure est monté de 6 lignes, combien devra-t-il monter pour 90 degrés du même thermomètre? Je trouve 36 lignes : c'est donc le chemin que ferait le mercure dans le tube, tandis qu'un thermomètre selon M. *de Réaumur* parcourrait 90 degrés. Cette quantité détermine la circonférence du fond de la rainure de la poulie; ainsi, en prenant un fil de soie, auquel on donne pour longueur 36 lignes, on fera la poulie de la grandeur requise si on la diminue jusqu'à ce que ce fil l'enveloppe en entier. *Puis on divisera le cadran.* »

1204. Nous ajouterons quelques développements à ces articles transcrits de *Ferdinand Berthoud*. L'ancienne physique, jusqu'au temps de *Galilée*, avait adopté l'opinion, idéale et sans base, que la nature avait *horreur du vide*, et croyait expliquer ainsi l'ascension

de l'eau dans les pompes aspirantes. Des fontainiers de Florence ayant construit une pompe de cette espèce pour faire monter l'eau à environ 50 pieds, et s'étant aperçus qu'elle s'arrêtait à la hauteur de 32 pieds, « *et ne voulait pas absolument*, disaient-ils, *monter plus haut*, » quoique le piston continuât de s'élever, consultèrent à ce sujet *Galilée*. Celui-ci connaissait déjà la pesanteur de l'air, mais il projetait des expériences ultérieures qu'il ne voulait pas encore communiquer ; il leur répondit donc ironiquement qu'apparemment la nature *n'avait horreur du vide que jusqu'à 32 pieds*. Peu de temps après la mort de *Galilée*, *Torricelli*, son disciple, continua ses expériences avec un tube de verre fermé d'un bout, rempli de mercure et ensuite renversé, et fit voir que si l'eau montait dans le vide à 32 pieds, le mercure n'y montait qu'à environ 28 pouces, et que la prétendue *horreur du vide* était, avec le mercure, bien moindre qu'avec l'eau. Il prouva enfin que l'équilibre entre le poids d'une colonne d'air de toute la hauteur de l'atmosphère, et celui d'une colonne *de même base* d'un autre fluide plus pesant, dont la différence de poids réglait la hauteur, était l'unique cause du phénomène, ce qui ruina complétement l'ancienne hypothèse. Mais jusqu'alors la philosophie d'*Aristote* était une loi, et le doute n'était *pas encore inventé*, ou du moins apprécié à sa juste valeur. On a su depuis qu'il fallait savoir *douter*, c'est-à-dire s'abstenir d'expliquer les causes que l'on ignore, et, faute de mieux, se borner à bien constater les faits. Ce principe prudent a procuré en effet plus de progrès dans ces derniers siècles, que n'en avaient fait auparavant tous les philosophes de l'antiquité.

1205. Le poids naturel de l'air et la pression qui en résulte, aujourd'hui bien connus, expliquent complétement l'ascension des liquides dans les tubes ou espaces où l'on parvient à produire le vide, de manière que ces liquides puissent seuls s'y introduire. Avec une balance très-sensible, on peut même peser un volume connu d'air contenu dans un ballon de verre ou de métal si, après en avoir établi l'équilibre avec un poids égal, on vient à y produire le vide au moyen de l'instrument, si connu en physique, qu'on appelle la *machine pneumatique* : car le ballon deviendra plus léger, et la somme du poids qu'il faudra lui adjoindre pour rétablir l'équilibre avec le premier poids resté dans son même plateau de balance sera égale à la pesanteur de l'air retiré du ballon.

1206. L'air pur est considéré en physique comme un corps simple, fluide, homogène, invisible, inodore, insipide, pesant, éminemment élastique, susceptible de condensation et de raréfaction, dans lequel l'homme et plusieurs animaux existent comme les poissons dans cet autre fluide que nous nommons l'*eau*. C'est parce qu'il est un corps, que dans son mouvement il acquiert, comme on le sait, la force de mouvoir les ailes des moulins, d'enfler et pousser les voiles d'un navire, etc., et même parfois de renverser les édifices les plus solides. Cet état de mouvement de l'air, produit par des causes physiques, constitue ce qu'on appelle le *vent*, expression abstraite d'une observation d'effet, et non d'un être particulier : elle n'exprime que le *mouvement* de l'air.

1207. Le mercure pèse à peu près treize fois et demie autant qu'un pareil volume d'eau ; il s'ensuit qu'une colonne de mercure à base égale ne doit être élevée par le poids

de l'air qu'à 28 pouces, ou à un 13e de 32 pieds à très-peu près : degré auquel une colonne d'air de la hauteur de l'atmosphère (15 à 16 lieues) élèverait une colonne d'eau de même base.

1208. On a vu, dans l'article de *Berthoud*, que la première condition pour former un baromètre parfait est d'exclure exactement l'air du mercure, comme aussi de l'intérieur du tube de verre. Il ne suffit pas de remplir celui-ci de mercure à la vue, car on y renfermerait plusieurs bulles d'air dont plusieurs, d'abord invisibles, s'en dégageraient plus ou moins promptement, après le renversement du tube, pour se porter dans sa partie supérieure nécessairement plus haute que 28 pouces, afin que le mercure puisse s'y élever suivant les divers degrés de pesanteur variable de l'atmosphère qu'il doit indiquer. Or l'air qui s'échapperait du mercure mal purgé diminuerait d'autant la perfection du vide voulu dans le haut du tube ainsi que la hauteur et la mobilité de la colonne de mercure. On a vu que le tube doit avoir 35 à 36 pouces de hauteur.

1209. La purification du mercure au travers d'une peau de chamois, selon la méthode vulgaire, est un moyen trop imparfait. On y a employé parfois le mercure revivifié du *cinabre ;* on préfère aujourd'hui sa distillation par la cornue. Mais il faut toujours le faire bouillir dans le tube, opération dans laquelle il n'est que trop facile de le faire casser ; pour l'éviter, il faut que la chaleur pénètre le plus également possible toute la longueur du tube et du mercure, et que l'un et l'autre ne soit froid nulle part. On est obligé de se munir de gants épais pour éviter l'action du feu sur les mains, ainsi que le sentiment de trop forte chaleur que le tube chaud pourrait leur communiquer. Au total, il serait utile d'avoir vu opérer quelques ouvriers assez bienveillants pour communiquer les secrets du métier, c'est-à-dire ce qu'ils nomment le *tour de main*. Le reste de l'opération se trouve à peu près indiqué plus haut, mais la sagacité de l'opérateur doit y suppléer souvent ; comme aussi il est utile de se procurer plusieurs tubes, au moins pour la première fois que l'on opère : car la rupture arrive très-facilement. Les ouvriers qui ne sont pas surveillés se contentent d'introduire le mercure à froid, et de le traverser d'un fil de fer pour en faire monter vers l'ouverture toutes les bulles d'air visibles ; mais ce moyen est insuffisant.

1210. Nous devons ajouter que le baromètre n'est bien précisément qu'un indicateur du poids momentané de l'air, dont la pluie et le beau temps ne sont pas toujours des conséquences obligées, et que le pronostic de ces deux résultats est presque aussi souvent faux que vrai. Le véritable usage du baromètre en physique est d'indiquer la pression de l'air, la hauteur des montagnes, ou d'autres lieux très-élevés, avec plus d'approximation que les instruments soit à pinnules, soit à lunettes, où la réfraction variable du rayon de lumière introduit des erreurs d'angle, surtout en hauteur. Mais pour cela, l'usage du baromètre est accompagné de celui d'un thermomètre et de tables appropriées. Cet instrument de physique et de topographie forme alors une sorte de canne portative qui se divise en trépied, où le tube est suspendu verticalement. Nous reviendrons plus loin sur la physique et la mécanique de ce sujet.

ÉCHAPPEMENTS A RECUL RENDUS ISOCHRONES

POUR L'USAGE CIVIL ET LES PENDULES DU COMMERCE.

DISPOSITIONS DE TROIS SONNERIES, L'UNE A RATEAU, L'AUTRE PAR ENCLIQUETAGE CIRCULAIRE, ET LA TROISIÈME SANS CHAPERON NI LIMAÇON,

Par MM. BROCOT PÈRE ET FILS, Horlogers-Pendulier, a Paris.

Ces diverses compositions sont exposées ici, suivant la communication donnée par leurs auteurs.

« Les travaux de la Pendule de commerce exigent une grande rapidité d'exécution, que nécessite l'extrême réduction de leur prix, jointe à la concurrence ; et, bien que la confection laissât beaucoup à désirer, il a toujours été difficile de s'occuper de leur amélioration. Nous avons néanmoins tenté d'y remédier par quelques modifications et inventions que nous allons indiquer, après avoir rappelé d'abord les principaux inconvénients de la construction usitée.

« 1° On sait généralement que les parties en action de l'échappement, d'ordinaire en métal poli, sont les plus sujettes à s'user et à produire des irrégularités croissantes dans la marche de la Pendule.

« 2° Qu'avec un pendule communément trop léger, la durée des oscillations est très-influencée, soit par l'inégalité d'action du ressort moteur, soit par les variations de longueur de la suspension à soie trop sensible aux effets hygrométriques, indépendamment de ceux de la température sur la verge du pendule.

« 3° Que la sonnerie ordinaire à *chaperon* ou roue de compte, bonne en elle-même quand elle est soignée, laisse toujours une trop grande facilité de désaccord avec les aiguilles, lorsqu'on remet la Pendule à l'heure, ou que, par négligence de l'époque voulue de remontage, le mouvement ou la sonnerie se trouvent arrêtés.

« 4° Que le déplacement d'une Pendule en altère nécessairement l'aplomb, qui ne peut être bien rétabli que par l'Horloger, nécessité gênante ou dispendieuse, suivant les localités, outre que le nouveau placement, même par un artiste, est difficilement identique avec le précédent.

« L'expérience de plusieurs années appuie favorablement l'adoption des moyens suivants, appliqués avec succès dans un grand nombre de nos mouvements livrés au commerce et à l'usage civil.

« 1° Les levées, dans nos deux échappements nouveaux, sont en pierre fine, et ne s'usent point ; la disposition des parties frottantes y retient l'huile et permet même des levées simplement en acier, sans différence sensible de durée.

« 2° Un pendule beaucoup plus pesant y réduit considérablement l'effet des inégalités du ressort moteur ; et le poids des lentilles exigeant des suspensions à ressorts, celles-ci, soignées sous divers autres rapports, et pourvues à volonté de compensateur, sont alors moins assujetties aux influences atmosphériques.

« 3° La construction particulière des sonneries, l'une à râteau, l'autre à encliquetage, la troisième *sans chaperon ni limaçon*, assure leur accord constant avec la position des aiguilles, lorsque celles-ci sont conduites à la main, soit en avant, soit en arrière; l'une de ces sonneries n'a plus besoin de repères, si gênants dans le remontage des mobiles en cage. Elles permettent la répétition de l'heure, facile à ajouter sans complication de cadrature, et qui peut remédier utilement à l'incertitude de la demi-heure entendue seule dans l'obscurité.

« 4° La communication du pendule avec l'échappement est disposée pour rétablir complétement l'*aplomb* nécessaire à la Pendule quand elle a été déplacée, et celui-ci ne s'altère plus, au moyen d'une amélioration simple et solide ajoutée à un procédé déjà connu, mais qui était insuffisant. Une impulsion un peu plus forte que d'ordinaire régularise exactement la *position* dite *d'échappement*, qui ne peut plus ici se déranger par l'effet de la marche.

« Deux échappements, de dispositions différentes, mais tirés du même principe et d'une exécution très-facile, atteignent un degré d'isochronisme plus approché que ne l'exigent les pièces à l'usage civil, ainsi que des expériences spéciales l'ont confirmé. Sans augmenter sensiblement la dépense commerciale, les pièces à ressorts, pourvues des perfectionnements ci-dessus, offrent une régularité égale à celle des pièces ordinaires à poids moteur.

« On n'indiquera ici que les dispositions principales : la figure 1, pl. XXXI, représente le plus simple des deux échappements, en forme d'ancre CAB, et portant pour levées de fortes chevilles coupées par moitié, qui reçoivent l'action des dents de la roue de rochet. Ces chevilles, de forme demi-cylindrique, sont en pierre fine, et leur établissement facile exige peu de dépense. Mais une assez longue expérience prouve que, faites simplement en acier trempé, elles sont très-durables et fonctionnent très-longtemps sans usure appréciable. Cet échappement réunit aux avantages connus de ceux ordinaires à ancre de *Graham* et de celui à chevilles un léger recul, important pour la régularité de la marche, au moyen de proportions et dispositions qui en font la différence principale. La roue de rochet est taillée pour faire coïncider les plans antérieurs de ses dents avec la tangente de l'arc décrit par le bras de levée, lorsque son sommet se trouve sous l'extrémité de la dent. La face de cette dent est dirigée au centre de sa roue, et l'on sait qu'à mesure de l'augmentation de la force dans le haut du ressort, comparée à celle du bas, l'arc supplémentaire augmente aussi proportionnellement; or, le sommet de la levée, se rapprochant du centre de la roue, occasionne à celle-ci un recul qui produit du retard pendant la demi-oscillation *ascendante;* mais ce même recul, accélérant d'autant l'autre demi-oscillation *descendante*, corrige le premier effet, au moyen des proportions établies d'après l'expérience; en sorte que dans les grandes oscillations la progression du recul est en rapport avec celle de la force motrice. Les impulsions sur les levées ont de plus ici l'avantage de ne point rencontrer d'angle, en passant du repos au plan d'impulsion; la direction des surfaces frottantes y contribue aussi puissamment à l'isochronisme. Du reste, cet échappement est plus facile à exécuter régu-

lièrement et au premier coup, que la grande ancre de *Graham*, et même que l'échappement à chevilles, et conserve très-bien son huile, qui s'extravase si aisément sur l'ancienne roue ordinaire de ce genre (1).

« Quant à l'*aplomb* de la Pendule, qui avait précédemment le défaut de se déplacer, la tige d'échappement est filée en vis en BA, fig. 7, sur laquelle l'assiette d'échappement porte un long canon CD, fig. 8, taraudé et fendu pour faire ressort avec pression assez forte et constante. Lorsqu'on imprime au pendule la force voulue d'impulsion, les levées vont butter sans inconvénient au fond des dents du rochet, effet qui, diminuant insensiblement, laisse bientôt pour résultat le *point* fixe d'*échappement*. La disposition et la solidité des parties ont permis d'établir ici un frottement assez puissant pour prévenir avec sûreté le déplacement du point d'échappement obtenu.

« Plusieurs moyens d'arriver à de bonnes suspensions à ressorts pour la Pendule ont été essayés. C'est ce que la variété de forme des boîtes ne permet pas aisément. Il faut d'ailleurs dans le commerce des constructions simples, peu coûteuses, ce qui complique encore la difficulté. La disposition des boîtes a nécessité quelques variétés dans ce mécanisme. Par exemple, dans la figure 2, même planche, le coq porte un piton fixe P fendu pour le passage libre et sans jeu des ressorts de suspension, vus par leur épaisseur, et figurés par la seule ligne *cd*. Une bascule en équerre BC*c*, centrée en C, soutient par son bras C*bc* la boîte ou mâchoire supérieure des ressorts; l'autre bras CB appuye sa cheville de dessous, pointillée vers *a*, contre les spires creuses d'un limaçon centré en D et susceptible de trois révolutions. Ce limaçon, pressé à l'ordinaire par une plaque élastique, est fixé à une tige qui élève au dehors de la seconde platine sa tête goudronnée, moyen connu non représenté ici, et servant d'ordinaire à mouvoir l'ancien avance-et-retard.

« Une compensation de température est jointe à la bascule formée des deux bras assemblés sur le centre C, comme ceux d'une fausse équerre dont la charnière serait libre. Le bras horizontal CB*c*, qui soutient la chape ou mâchoire des ressorts, appuie par une saillie en *b* sur l'extrémité supérieure d'une verge de zinc, dont le bout inférieur est fixé sans gêne par une vis à portée sur l'extrémité B de la verge d'acier, formant l'autre bras vertical de la bascule. Une autre vis à portée en *e* maintient le haut de la verge de zinc parallèlement à la verge d'acier B; une ouverture longitudinale du zinc en *e* le laisse libre de s'allonger ou de se raccourcir plus que l'acier, par les diverses températures. Ainsi les variations en longueur du zinc maintiennent l'équerre plus ou moins ouverte, quel que soit son point d'appui sur le limaçon, ce qui peut corriger les effets de la tem-

(1) Dans la figure 1, il y a un peu trop de distance entre la cheville de droite et la pointe des dents de côté; mais on sait, et nous l'avons assez dit, que la gravure des pièces d'Horlogerie ne peut comporter toute l'exactitude des mesures, vu le retrait du papier alternativement mouillé, séché, satiné, etc., et que ce n'est jamais sur la planche, mais dans les explications du texte, qu'il faut chercher la précision des mesures; autrement, on pourrait copier sans comprendre, et ce n'est pas le but des descriptions de cet ouvrage. Les figures ne sont données que pour présenter à l'œil l'ensemble des compositions; le texte seul doit diriger l'intelligence des détails. (*Note de l'Éditeur.*)

répature sur le pendule, quand on a étudié la longueur convenable du zinc et du bras d'acier pour chaque longueur de pendule. C'est à quoi a servi une *étuve d'épreuve* que nous avons construite exprès.

« Pour trouver plus aisément le degré de correction, on a pratiqué, dans une autre construction, fig. 3, une vis de rappel qui permet d'éloigner plus ou moins du centre de l'équerre, et pour tâter l'effet, l'extrémité supérieure du zinc, où s'appuie la partie *b* dont la face de dessous doit être courbe et concentrique au point B.

« Dans la figure 4, le piton fendu qui reçoit les lames est mobile verticalement entre deux languettes, au moyen d'une vis de rappel qui est à l'arrière, et ne se voit que dans son profil, fig. 5. Cette vis porte en dessus une roue dentée F, où engrène à angle droit une autre roue plus petite *ga*, portée par un axe aboutissant dans le haut du cadran de la Pendule, vers 60 minutes; la tige s'y termine par un carré reçu dans une clef ordinaire de Montre. Un ressort à sautoir, qui n'est pas représenté, y compte sensiblement pour la main les dents de la petite roue que l'on fait passer sous le ressort, et un chiffre qui accompagne le point de 30 minutes, au bas du cadran, indique combien il faut faire passer de dents sous le sautoir pour produire l'avance ou retard d'une minute en 24 heures. La valeur du chiffre est proportionnée à la longueur du pendule. La disposition autour des lames les garantit aussi d'être forcées. Dans cette construction, le pas très-fin de la vis de rappel et la différence de diamètre des deux roues réduisent les effets de la clef à des 70es de millimètre, au moyen desquels on peut facilement modifier la marche de la Pendule par des quantités minimes et connues, ce qui rend le réglage définitif plus prompt et plus direct. On supprime ainsi le bouton ordinaire placé à l'arrière du mouvement, où la main, arrivant difficilement, est souvent induite en erreur par le sens retourné, outre l'ignorance des quantités produites.

« Ces divers systèmes, avec un pendule à forte lentille, sont appliqués à tous nos mouvements de commerce, suivant la disposition des boîtes, où l'on trouve très-difficilement la place des innovations utiles. Car si le bon sens veut que les boîtes soient faites pour les mouvements, il arrive aujourd'hui que, par un renversement de principes trop commun, ce sont les mouvements qui sont assujettis aux formes des boîtes, dont l'esprit de mode et de nouveauté dispose sans réflexion ni prévoyance (1). Aussi ces constructions ne sont-elles pas données ici comme le résultat absolu de ce qu'on peut faire de mieux pour l'usage civil, mais seulement comme ce que la variété si contrariante des dimensions des boîtes actuelles nous a permis de pratiquer, nous réservant d'y porter d'autres améliorations quand la forme des boîtes le permettra. C'est pourquoi, au lieu d'une description détaillée, l'on se borne ici à une simple notice de ces dispositions, suffisante, du reste, pour en donner une première idée.

(1) On voit ici que l'Horlogerie en Pendules en est au même point que celle en Montres. Nous avons déjà signalé ailleurs ces *aberrations* qui sacrifient, ici comme dans bien d'autres cas, le but principal, la mesure exacte du temps, qui ne s'obtient que par la solidité et les bons principes de construction, à la fantaisie, au caprice et au délire d'un goût égaré et corrompu, et soumet presque généralement la raison à des influences absurdes. (*Note de l'Éditeur.*)

Des échappements de Pendule tendants à l'isochronisme.

« Plusieurs habiles artistes ont adopté les échappements à repos pour les grands régulateurs à secondes, dont la longueur du pendule plus ou moins chargé d'accessoires compensateurs, de curseur, etc., équivaut en résultat à la longueur du pendule simple et théorique de 3 pieds 8 pouces ,57. La puissance d'une forte lentille, la réduction des arcs avec un faible supplément, la force constante du poids moteur, les dispositions libres de détail que les dimensions des boîtes permettent abondamment, ont en effet procuré en ce genre des résultats très-satisfaisants. Mais il n'en est pas ainsi des pièces à demi-secondes et à courts pendules, c'est-à-dire de 9 pouces 2 lignes et environ ,14 suivant la théorie, et que le seul poids du métal allonge déjà un peu plus (la longueur du modérateur est bien plus restreinte encore dans la plupart des Pendules d'appartement, dont les oscillations sont plus promptes que celles à demi-secondes).

« Avec ces pendules courts, outre la légèreté de la lentille, les oscillations sont entretenues par la force variable d'un ressort moteur, et l'on n'y supplée en partie à la puissance de la lentille que par de plus grands arcs dans le haut du ressort, nécessaires pour conserver encore assez d'étendue aux fonctions de l'échappement dans le bas d'armure. Mais cette grande étendue produit beaucoup de traînée et de frottement sur les repos, et les pièces de ce genre n'ont jamais une marche comparable à celle des régulateurs à long pendule et à poids, avec des arcs *modérément* réduits.

« On a essayé en divers temps de remédier au défaut des pendules courts avec ressort de barillet, en cherchant dans le recul de l'échappement une compensation *isochronique* pour les arcs de différente étendue. Outre la divergence des opinions et des moyens sur ce sujet, la principale difficulté consistait dans la proportion graduée du recul d'un même échappement, avec les diverses longueurs du pendule, avec leur pesanteur et l'étendue de leurs arcs; il aurait fallu (par exemple, pour l'échappement à ancre isochrone de *Ferd. Berthoud*) essayer autant d'ancres qu'il se trouvait de différences dans la longueur, le poids et les arcs des pendules. C'est ce qui a dégoûté les artistes de cette recherche. Néanmoins on a essayé la solution de cette difficulté dans la composition suivante, disposée pour être à volonté à repos, ou à divers degrés de recul, sans refaire ni changer la pièce principale d'échappement.

Échappement à repos, ou avec plus ou moins de recul, à volonté, pour atteindre l'isochronisme approché des oscillations, dans une Pendule ordinaire d'appartement à ressort moteur, pl. XXXI, figure 6.

« Dans la pièce dont il s'agit la force du ressort moteur du barillet est transmise à l'ordinaire par un rouage simple, à deux dernières roues semblables de grandeur et de nombre, dentées comme les autres, mais engrenant ensemble par leurs limbes, d'où il suit que chacune tourne en sens contraire de l'autre. Leurs axes sont en cage à la même hauteur horizontale; chacun de ces axes porte un rochet d'échappement situé à pareille distance de sa roue, et les deux rochets sont dans un même plan commun, comme les

deux dernières roues le sont en arrière ; mais le diamètre des deux rochets étant un peu moindre que celui des deux roues qui s'engrènent, les circonférences totales de ces rochets laissent entre elles, sur la ligne des centres, un espace égal à l'étendue d'une levée d'impulsion, ou autrement dit, égal à l'arc de levée. Les rochets sont fixés sur leurs axes, à l'égard de l'engrenage des deux autres roues, de manière à faire correspondre la pointe des dents d'un rochet exactement au milieu du vide des dents de l'autre rochet, ce qui exige beaucoup d'uniformité dans les dentures.

« Un seul bras de levier, fixé à l'axe d'échappement, descend verticalement en arrière des deux rochets, et porte vers la ligne des centres une forte cheville saillante ; sa forme, qui se présente en coupe dans le dessin, figure une sorte de triangle *isocèle* et *mixtiligne*, dont le sommet est arrondi, en sorte que sa hauteur totale est égale à la demi-distance entre deux dents d'un rochet, sauf l'ébat nécessaire à la liberté des effets. Dans les oscillations, la cheville suffisamment saillante sur son levier pour dépasser le plan commun des rochets et ne pas laisser extravaser l'huile, promène alternativement son sommet arrondi sous la face agissante (inférieure, dans la figure) des dents des deux rochets, et, lorsque ce sommet sort de dessous la face des dents, il présente à leur extrémité ses côtés inclinés servant de plans d'impulsion, ou levées.

« On conçoit que si les faces antérieures et agissantes des dents sont taillées suivant une courbe concentrique à l'axe d'oscillation, dans leur position sur le sommet de la cheville, l'échappement se trouvera *à repos ;* mais que si le bras du levier est plus ou moins raccourci, le sommet de la cheville fera reculer la face des dents dans l'arc de supplément, et que par ce moyen l'échappement sera plus ou moins *à recul*.

« C'est à produire cet effet que sont destinées une coulisse sur l'assiette en *a*, figures 6 et 8 et une vis verticale *b d* de rappel qui se voit en arrière du levier en profil, figure 8 ; l'extrémité *b* de la vis est fixée à demeure dans l'assiette d'échappement en *b*, et un écrou taraudé en *c c* peut, comme une sorte de tête, faire remonter le levier dans sa coulisse du haut, et avec lui la cheville triangulaire, et raccourcir ainsi le levier *virtuel* d'une quantité connue par la division du limbe et la progression du pas de vis.

« La situation actuelle des parties dans cette figure 6, représente et produit le degré de recul nécessaire à l'isochronisme du pendule dans la pièce qui a été vue posée sur un chevalet d'épreuve à l'exposition de 1839. Dans des expériences préalables auxquelles cet échappement avait été soumis, on avait constaté qu'étant au repos, avec la force motrice tantôt réduite à moitié et tantôt doublée, il a donné 17 secondes de différence diurne entre les effets de ces diverses forces ; mais que, étant établi avec un recul connu par le moyen de raccourcissement du levier, la marche, malgré les mêmes différences de force motrice, s'est maintenue presque constamment égale, ses plus grandes variations s'étant réduites entre une seconde et une seconde et demie, en 24 heures. Ces expériences avaient été journellement répétées pendant deux mois dans l'atelier de M. *Duchemin*, par qui l'exactitude en fut constatée, et qui adapta ce même échappement aux deux nouveaux pendules compensateurs à mercure, qu'il présenta à la même exposition.

« NOTA. On a remarqué dans les expériences, que cet échappement mis *à recul* décrit constamment de plus grands arcs que lorsqu'il est à repos ; ce qui paraît devoir être attribué à l'inclinaison relative de la face antérieure de la dent, à l'égard de l'arc décrit par le levier raccourci, cette disposition produisant déjà une légère impulsion sur le demi-arc de supplément descendant, même avant que l'extrémité de la dent n'agisse sur la levée, ce que l'on conçoit aisément d'après la figure.

« Dans l'échappement précédent à ancre et ne comportant qu'une seule roue, le même recul a lieu, à proportion des dimensions du pendule, et la marche régulière qui en résulte, sans usure, même sur les levées en acier, fait adopter de plus en plus dans le commerce cette construction plus simple.

SONNERIE DE PENDULE A RATEAU ET SANS REPÈRES, PL. XXXI, FIG. 7.

« Le rouage de cette sonnerie est celui ordinaire, sauf que la détente intérieure *d* arrête ici, non la troisième roue, mais la 4ᵉ dite de délai Z, dont une longue cheville fixe et à double effet traverse tout à fait le limbe. La roue de chaussée se voit pointillée en X sous le limaçon des heures porté par la roue de canon marquée au trait. Les deux chevilles de chaussée, *n* pour l'heure, et *n'* pour la demie (celle-ci plus rapprochée du centre), élèvent le détentillon O *oeg* ; celui-ci porte en *e* une cheville qui, pour la préparation, soulève : 1° le bras B *e* en charnière libre avec la boîte B, fixée à carré sur l'axe du marteau ; 2° l'*esse h* aussi à carré sur l'axe de détente *d*. Quand la détente dégage un côté d'une double cheville portée par la roue de délai Z, celle-ci sollicitée par le moteur va reposer l'autre bout de cette cheville à double effet sur le lardon de détentillon, qui pénètre par l'ouverture ordinaire de la platine en Z.

« Pendant ces effets, une cheville demi-cylindrique *g* portée par le détentillon, s'est dégagée des dents du râteau R, dont l'extrémité *g* tombe par son propre poids sur la tête du bras B*e*, terminée par un retour d'équerre avec plan incliné du bout, dont l'angle aigu est propre à former plus tard encliquetage avec les dents du râteau.

« Le détentillon continuant à être soulevé par la cheville *n* recule encore plus le bras B*e*; et lorsque l'extrémité *g* du râteau n'en est plus soutenue, le râteau tombe complétement jusqu'à ce que son bras R repose sur le point du limaçon correspondant à l'heure du cadran : ces deux effets forment la préparation.

« Lorsqu'enfin, au point de 60 minutes, la cheville *n* quitte le détentillon, celui-ci tombe à son tour, et son lardon dégage la cheville de la roue Z ; alors le rouage intérieur peut courir et sa roue de chevilles agir à l'ordinaire sur l'axe du marteau. Mais le marteau ne peut s'élever sans mouvoir angulairement la boîte B en charnière avec B*e*, et chaque élévation du marteau repousse en hauteur le bras B*e*, dont la tête en cliquet, engagée dans les dents du râteau, remonte d'une dent celui-ci, maintenu à mesure par la cheville demi-cylindrique *g* du détentillon, dont le poids occasionne cet encliquetage de *g* avec les dents du râteau.

« Chaque fois que le marteau tombe sur le timbre, le point B s'abaisse, entraînant

vers le bas B*e*, qui descend d'une dent sur le râteau retenu en *g*, et celui-ci est remonté de cette même dent quand le marteau se relève ; ainsi c'est le va-et-vient du marteau et du point B, qui remonte le râteau, en frappant sur le timbre autant de coups qu'il se trouve de dents descendues tout à coup sur le limaçon, chaque degré d'une dent répondant à un coup. Le dernier abaissement du marteau, dégageant le bras B *e* de l'extrémité *g*, ce bras retombe sur la cheville *e* du détentillon.

« Pour la demi-heure, l'autre cheville *n'* de chaussée, moins éloignée de son centre, ne soulève le détentillon que de la quantité voulue pour dégager Z ainsi que le bout *g* du râteau ; en sorte que, dans cette petite chute valant une dent, le râteau ne peut que s'appuyer sur le haut du bras B*e*, et le marteau, en s'élevant pour un seul coup, remonte le râteau du seul espace descendu ; car la cheville de Z, arrivée d'abord par la préparation sur le lardon du détentillon, et devenue libre par la chute complète de celui-ci à la 30[e] minute, achève ses neuf tours pour un coup, puis se trouve arrêtée de nouveau par la détente intérieure *d*.

« L'arrêt du rouage se faisant ici sur une roue plus éloignée de la force motrice, le dégagement de celle-ci, dont l'appui est diminué suivant le rapport de son pignon avec la roue précédente, est beaucoup plus doux. Le rouage n'exige plus ici ces repères si gênants des sonneries ordinaires, et les aiguilles conduites à la main, soit en avance, soit en retard, ne peuvent faire mécompter la sonnerie, vu que le limaçon est forcément d'accord avec les aiguilles.

Cadrature de sonnerie sans râteau ni chaperon. (Pl. XXXI, fig. 9.)

« Cette autre cadrature de sonnerie est vue en repos comme la précédente ; mais une roue taillée en rochet sur le nombre 90, est montée à carré sur l'axe (saillant sous le cadran) de la 1[re] roue de sonnerie. Cette roue à rochet passe en dessus du détentillon dont un bras courbé vers le centre est presque concentrique à la denture du rochet, mais moins haut que le fond de ses dents ; ce bras contourné n'est ici que pointillé, parce qu'il passe dessous le rochet. Lorsque la cheville *n* de chaussée pour les heures élève le détentillon, le bras contourné de celui-ci soulève la cheville en *c* d'une sorte de cliquet D*c* porté par la bascule de limaçon BE ; l'autre bras droit du détentillon repousse en même temps l'esse, et la détente intérieure cessant de retenir le rouage, la cheville de délai va se reposer sur le lardon traversant librement la platine comme à l'ordinaire. L'élévation du détentillon continuant dégage l'encliquetage D*c* de la bascule avec la roue de rochet ; alors cette bascule tombe par son seul poids, et fait appuyer sur le limaçon une cheville demi-circulaire en E qu'elle porte en dessous.

« Lorsque l'aiguille de chaussée arrive sur 60' et que la cheville de délai échappe au lardon de détentillon, la courbe de celui-ci, en s'abaissant, abandonne le cliquet D*c* à l'effet d'un ressort qui engage la cheville de ce cliquet dans une des dents du rochet. L'esse pressée par son ressort ordinaire tomberait en même temps : mais

sa cheville en *i* appuyant sur la portion de cercle en *ih* la plus élevée du bras de la bascule de limaçon, l'esse reste assez élevée pour ne pas gêner les révolutions du rouage ; et celui-ci, par sa roue ordinaire de chevilles, fait lever et laisse frapper le marteau jusqu'à ce que la roue du rochet tournant à gauche ait remonté en entier la bascule de limaçon, et que la partie plus basse *i*D du bras de bascule laisse achever tout à fait la chute de l'esse en *i* pour arrêter le rouage.

« Dans cette sonnerie les repères sont observés comme à l'ordinaire pour le rapport de la progression de la 1re grande roue et de son rochet avec les autres roues de chevilles qui servent à faire frapper les heures; car rien n'est changé dans le mécanisme intérieur, si ce n'est que la détente ordinaire n'a plus sa partie en couteau, supprimée ainsi que la roue de compte ou chaperon.

« De même que dans la sonnerie précédente, l'effet de la demi-heure est produit par la moindre élévation de la cheville *n*' de chaussée, qui ne soulève le détentillon que de la quantité voulue pour que la roue de délai opère son premier demi-tour, et sans laisser tomber la bascule sur le limaçon ; alors la sonnerie ne peut donner qu'un seul coup, après la chute du détentillon.

« Avec ces deux sonneries, il est facile d'établir au besoin une bascule de répétition pour l'heure seule, au moyen d'un cordon qui circule dans l'appartement, afin de préciser la signification équivoque de la demi-heure lorsqu'on ne voit pas le cadran.

COMPTEUR,

PROPRE A TROUVER RAPIDEMENT, POUR LES PIÈCES A L'USAGE CIVIL, LE RAPPORT DE LONGUEUR DU PENDULE AVEC LE NOMBRE D'OSCILLATIONS PAR HEURE.

Pl. XXXII, fig. 1.

« Un piédestal commun, pesant et solide, porte deux cages de forme semblable, celle d'un carré long placé en hauteur. L'ensemble est un peu plus élevé que pour la hauteur totale du pendule ordinaire à demi-secondes.

« La cage de gauche contient un mouvement simple à demi-secondes, exactement réglé sur le temps moyen. Sa force motrice est un ressort dans un barillet denté; son plus grand cadran porte les heures et minutes. Le petit cadran excentrique vers midi est celui des demi-secondes que bat son pendule simple.

« La cage de droite, qui est le *Compteur* proprement dit, contient un rouage avec échappement, disposé pour compter seulement le nombre d'oscillations d'un pendule de longueur quelconque, depuis celui à demi-secondes jusqu'aux plus courts en usage. Ses cadrans à divisions décimales sont disposés comme le rouage, uniquement pour marquer jusqu'à 100,000 le nombre d'oscillations. La fourchette de ce mouvement peut s'appliquer à toute grosseur de verge et à toutes les formes de pendule, et le coq peut recevoir toute espèce de suspension.

« On sait qu'un gril de compensation vraie ou figurée, ou bien des ornements et autres accessoires d'un pendule, y influent sensiblement sur la distance du centre de suspension au *centre d'oscillation*, distance qui détermine la longueur *virtuelle* du pendule, pour un nombre voulu d'oscillations; que tout pendule doit être exécuté d'abord trop long, avec la faculté de le raccourcir au besoin ; mais que cet ajustement exige de longs tâtonnements; c'est pour abréger et préciser ce travail que le compteur dont il s'agit a été composé.

« Si l'on a, par exemple, un pendule à demi-secondes, simple ou chargé d'accessoires, à mettre à sa vraie longueur, on l'adapte au compteur avec sa suspension. On arrête les roues d'échappement des deux mouvements au moyen d'une bascule commune qui pénètre entre les dents de ces deux roues; on remonte les ressorts moteurs, et l'on place sur leurs points respectifs de 60 les aiguilles d'heure, minute et seconde du mouvement de gauche qui est le *garde-temps ;* on place aussi celles du compteur sur les points 0 de départ de leurs divisions décimales; on met les deux pendules en mouvement, et, lorsque leurs oscillations coïncident visiblement d'un même côté, la bascule de communication est dégagée subitement pour laisser marcher simultanément les deux roues d'échappement et leurs rouages pendant une ou plusieurs heures, à volonté.

« Un mécanisme intermédiaire, fort simple, placé en M, conduit par le *garde-temps* de gauche (avec une sorte de roue à détente, de réveil, ce qu'il serait superflu de détailler), laisse retomber après un intervalle voulu la bascule commune, indiquée ici par une ligne pointillée, et les deux roues d'échappement sont arrêtées simultanément, ainsi que les aiguilles; le nombre d'oscillations dans un temps donné du pendule éprouvé, est ainsi désigné par les aiguilles du compteur. Comme la verge du pendule à régler doit toujours être tenue trop longue, on connaît par le nombre d'oscillations qui manquent à celui voulu la quantité dont cette verge doit être raccourcie. Deux ou trois observations semblables suffisent aisément pour faire battre au pendule le nombre d'oscillations marqué par la table usitée des longueurs, ou bien pour connaître le nombre d'oscillations résultant d'une longueur donnée, accompagnée ou non d'accessoires et ornements d'usage.

« On a dit ci-dessus que les divisions décimales des trois cadrans du compteur peuvent indiquer jusqu'à 100,000. Lorsque la situation des aiguilles indique qu'à partir de zéro, les oscillations ont été arrêtées à 7,200, c'est alors le nombre de celles du pendule à demi-secondes dans l'intervalle d'une heure. On a appliqué sur le piédestal de l'instrument deux tables des longueurs *virtuelles* du pendule simple en rapport avec le nombre d'oscillations, pour les deux nombres les plus usités des rouages ordinaires. La table des longueurs indique celle du pendule théorique; mais dans l'exécution la plus simple, le poids de la tige de la lentille, et d'autres parties, exigent toujours un peu plus de longueur que celle qu'on laisse ordinairement par précaution pour régler le pendule. »

CADRATURE RÉCENTE D'UNE SONNERIE A RATEAU SANS LIMAÇON NI CHAPERON.

« Les deux pièces principales de cette cadrature, qui sont le râteau R et la roue A, offrent l'application simple et directe de cette propriété géométrique du cercle : « *Tout* « *angle rectiligne dont le sommet est à la circonférence d'un cercle, et qui est formé par* « *deux cordes, a pour mesure la moitié de l'arc compris entre ses côtés.* »

« La fig. 2, pl. XXXII, est la face extérieure de la platine des piliers, qui se trouve sous le cadran. Les pièces ordinaires sont simplement pointillées, pour laisser plus distinctes celles dont la forme ou la situation sont différentes. Le rouage de sonnerie en cage se compose à l'ordinaire du barillet, de la roue de temps, de celles à chevilles et du volant ; mais il n'y a point de chaperon, et la détente intérieure, toute simple, ne porte point de couteau : son axe est reçu à carré dans l'*esse e* dont l'extrémité diffère un peu de la forme ordinaire, outre qu'elle fonctionne comme cliquet, pour maintenir le râteau, dont nous parlerons plus loin, à mesure qu'il est remonté. L'esse porte en dessous une cheville, pointillée en *e*, qui repose sur le bras B de détentillon, pour être élevée simultanément avec lui, lors de la préparation de l'heure. Le pivot de la roue de détente, prolongé au dehors de la platine, porte une palette P qui à chaque révolution de sa roue remonte une dent du râteau. Le détentillon a son bras inférieur B de forme ordinaire, sauf qu'il est entaillé en dessus pour former un plan incliné pris dans son épaisseur et sur sa largeur, de manière à être atteint et relevé par les chevilles de chaussée, marchant en avant, et à laisser glisser ces mêmes chevilles sur le plan incliné lorsqu'on les fait reculer : le bras B est assez flexible pour céder élastiquement dans le cas où il est forcé de se rapprocher de la platine ; c'est aussi ce bras qui élève la cheville *e* de l'esse. L'autre bras supérieur ne sert que pour arrêter la cheville de la roue de délai, par le lardon traversant à l'ordinaire l'ouverture en Z de la platine. Les deux chevilles de la chaussée sont à distance inégale de leur centre, comme dans les deux sonneries précédentes (où les détentillons ont aussi leur plan incliné), pour que la plus basse ne produise que l'élévation du détentillon nécessaire à l'effet de la demi-heure.

« Le limaçon supprimé ici est remplacé par un pignon central de 16 ailes, fixé au centre de la roue ordinaire dite de *canon*, ou de *cadran ;* ce pignon mène la roue A de cadrature ajoutée ici, et centrée vers le rayon de midi : cette roue tourne sur une broche ou tige fixe de la platine ; elle a 96 dents, et son limbe porte 6 chevilles implantées verticalement à égale distance du centre, et dont les intervalles égaux comprennent 16 dents de la roue, menées par un tour du pignon central de 16 ailes, lequel tourne en 12 heures, comme la roue de canon qui le porte. Le diamètre de la roue de chevilles est du reste en rapport avec celui de son pignon ; cette roue A fait sa révolution en 3 jours, et deux de ses chevilles quittent en 24 heures le haut du rayon de midi, pour en descendre à gauche.

« Le râteau a son centre de mouvement angulaire, ou de chute, sur une tige fixe, exactement centrée sous un point de la circonférence décrite par les chevilles de la roue 96. Un bras, fixé en R sous le râteau par 2 vis, est replié en dessus à l'équerre, et

sa partie *ab* passe parallèlement au-dessus de la roue de chevilles, sans y frotter; sa ligne droite est dirigée vers le centre de mouvement du râteau; lorsque celui-ci est remonté et en repos, la pièce *ab* représente un des côtés de l'angle géométrique cité plus haut; son extrémité *b* est affleurée par le passage des chevilles de la roue 96, sauf un jour de sûreté pour en éviter le contact; mais quand le râteau abandonné à son propre poids tombe vers le centre, sa ligne *ab* s'appuie sur une des chevilles, qui l'a toujours dépassé lorsque l'aiguille de minutes arrive à 60', et la position de *ab* représente alors l'autre côté de l'angle susdit, en sorte que la portion d'arc parcourue par le râteau est proportionnelle au progrès de la cheville descendant sur la gauche, et au nombre d'heures qui doit sonner. Les autres détails d'exécution sont facilement indiqués par l'exigence des effets suivants, et seront suppléés par la figure.

« Lorsque la cheville de chaussée pour l'heure soulève le bras B du détentillon, celui-ci soulève aussi la cheville *e* de l'esse et avec elle la détente intérieure; la roue de détente avance alors de quelques degrés, en obligeant comme d'ordinaire la roue de délai de reposer sa cheville sur le lardon du bras en Z. L'extrémité de l'esse est aussi dégagée en partie du râteau, qui ne descend pas encore, étant retenu par la forme du bec de l'esse, vue dans la figure; c'est la première partie de la préparation qui se fait en deux temps, la roue de délai restant encore arrêtée sur le lardon et retenant le rouage de sonnerie. La progression de la chaussée continuant, achève ensuite de dégager complétement l'esse d'avec le bout du râteau; celui-ci tombe alors en appuyant la pièce *ab* sur la plus proche cheville à gauche de la roue 96; c'est la seconde partie qui complète la préparation. Lorsqu'enfin la cheville de chaussée et son aiguille de minutes sont arrivées au point de 60', la chute du détentillon laissant le rouage libre, la palette P du pivot de la roue de détente remonte à chaque tour une dent du râteau, pour laquelle le rouage fait frapper un coup de marteau, et l'extrémité de l'esse, libre aussi de tomber dans les dents du râteau, y fait encliquetage pour le maintenir, comme dans l'une des deux pièces précédentes; mais, par l'élévation de la denture du râteau, elle tient la détente intérieure suffisamment élevée pour la liberté du rouage.

« Lorsque le nombre d'heures, déterminé par la situation de la cheville de la roue 96, où s'est appuyée la pièce *ab* du râteau, a été frappé, l'extrémité en *g* de celui-ci laisse tout à fait libre l'esse, qui, tombant alors un peu plus bas, laisse arrêter le rouage par la détente intérieure.

« Lorsque c'est la cheville *n'* de chaussée la plus proche de son centre qui élève le détentillon, elle ne dégage pas tout à fait la première dent du râteau, encore retenue par la coupe concentrique du bout de l'esse, et, cette première partie de la préparation étant seule effectuée, la cheville de chaussée, qui ne s'élève pas davantage, laisse retomber le détentillon au point de 30', et la roue de détente ne peut qu'achever son tour qui ne donne qu'un seul coup de marteau pour la demi-heure. Du reste, cet effet de chaussée pour la demi-heure est à peu près le même que dans les deux sonneries précédentes.

« Ce qui caractérise donc principalement cette sonnerie, est l'intervalle des chevilles de la roue 96, et leur progression, qui remplacent l'effet du limaçon bien plus long à

tailler et à justifier; car l'arc compris entre deux chevilles étant un 6e du cercle de leur roue sur lequel elles sont implantées, les arcs entre elles sont de 60°. L'angle décrit par le râteau pour 12 heures est alors de 30°, suivant le principe géométrique cité en tête de cet article ; chaque cheville s'abaisse régulièrement de 5° par heure, relativement à sa roue ; mais le râteau ne s'abaisse alors que de deux degrés et demi à l'égard du centre de son mouvement angulaire, et l'arc de ses dents peut être divisé également et se trouver en rapport avec l'abaissement régulier de la cheville, c'est-à-dire être divisé en 12 parties égales occupant 30 degrés. Il en résulte que le râteau étant divisé sur le nombre de 12 fois 12 ou 144, chaque dent sera de 2° 1/2.

« Nota. Les deux levées de l'ancre du premier échappement décrit avec une seule roue sont formées chacune d'un quart de cercle, comme approximation suffisante pour la régularité des pièces à l'usage civil, l'expérience en a donné la preuve; mais, dans le deuxième échappement à deux roues, dont le recul s'établit à volonté pour produire un isochronisme plus approché, la coupe de la cheville pour les deux levées est, en principe, une courbe parabolique combinée géométriquement, et en proportion de la résistance du pendule dans les différents points de son arc de levée. Ce n'est donc que pour abréger, et pour éviter quelques figures géométriques de démonstration, que cette courbe a été simplement indiquée comme une *sorte de triangle mixtiligne*. Plusieurs outils et instruments de précision ont dû aussi être créés pour établir rapidement les dimensions géométriques relatives des parties de l'échappement, fabriquer les suspensions et en supprimer tous les tâtonnements que n'admet point l'économie de temps dans la fabrication en nombre, pour le commerce (1). »

1211. Nous avons indiqué dans ces trois dernières feuilles les améliorations qui nous ont été communiquées ; ce n'est qu'une partie la plus récente de ce que l'art a acquis depuis le commencement de ce siècle, et que l'on trouve publié et gravé dans les *Mémoires de la Société d'encouragement de Paris pour l'industrie nationale*. On en trouvera l'indication dans la table générale et fort utile de ces mêmes mémoires qui datent de plus de 30 ans. Nous ne pouvons en grossir cet ouvrage, mais nous reviendrons en partie sur ce sujet aux articles des Régulateurs de précision, des Pièces marines, et des Compteurs d'observation. Nous allons reprendre en attendant d'autres éclaircissements promis un peu plus haut.

1212. Dans la figure du remontoir de *Mudge*, pl. XXX, fig. 4, donnée d'après *Berthoud*, les proportions trop grêles des parties ne sont point conformes à celles de la planche originale de l'auteur anglais ; mais, dans celle-ci, l'élévation géométrale cache

(1) En faisant connaître ces diverses constructions, leurs auteurs n'ont pas eu l'intention de rivaliser avec d'autres artistes habiles et contemporains, mais d'user simplement comme eux de la faculté de publier des produits utiles au commerce et à l'usage civil, honorés de trois médailles aux expositions et du suffrage de plusieurs exposants. *On sait que la sûreté n'en est garantie que chez les auteurs brevetés*. (*Note de l'Éditeur.*)

plusieurs effets qui ne peuvent être saisis qu'au moyen d'un plan à part, et de plusieurs figures de développement. Pour une composition qui ne s'applique plus aujourd'hui, nous avons préféré, par abréviation, la figure donnée par *Berthoud*, quoique informe quant aux proportions réelles, mais expliquant mieux plusieurs effets figurés en perspective. Nous y ajouterons les observations suivantes.

1215. On a vu dans la fig. 4, pl. XXX, que le balancier *bb* à manivelle de *Mudge*, accompagné de son spiral particulier *tt*, est indépendant des deux verges d'échappement GR et FI, qui ont chacune leurs deux pivots, et leur spiral à part. Or, le balancier et sa manivelle XY étant au repos de leur propre spiral, et la roue de rencontre étant supposée momentanément sans action, les spiraux des deux verges à palette ramènent aussi leurs bras horizontaux GO et IK à leur repos qui coïncide avec celui des branches verticales LM et WZ de la manivelle. Ainsi dans ces cas supposés de repos, le bras horizontal du haut de la fig. en GO est, pour le spectateur, en avant de la branche LM à laquelle elle ne fait que toucher, sans autre action : de même le bras horizontal IK du bas de la figure passe en arrière de la branche WZ avec laquelle elle est seulement en contact; mais dans l'action de l'échappement cet état de repos des trois spiraux n'est qu'instantané, et leur repos libre est ici une supposition pour mieux expliquer les effets du mécanisme. Car la roue étant toujours en action contre une palette, par exemple, la dent du haut contre sa palette *l*, le bras GO de cette palette se porte en *a* dans le sens de se rapprocher du spectateur, et de 27°, dont la palette est déplacée par la roue arrêtée ensuite par le rebord de la palette, en commençant ainsi d'armer d'autant son spiral *u* plus fermé ; en sorte que si le balancier en mouvement, et tournant à gauche comme de *b* vers X, est ramené d'une excursion ou arc de supplément précédent et en sens contraire, il ne rencontre plus GO au point de repos commun supposé ci-dessus, et indiqué par le trait noir de la gravure, mais seulement en *a*, 27° plus loin, comme l'indiquent les lignes grises ou pointillées qui se croisent en *a*. C'est donc seulement en ce point que la manivelle dégagera le rebord de la palette *l* d'avec la dent de la roue, et conduira le bras GO et sa palette beaucoup plus loin, c'est-à-dire de tout l'arc de supplément.

Lorsque la dent *l* du haut de la roue a été dégagée du rebord de sa palette, la dent *m* du bas de la roue est portée immédiatement par la force du rouage contre la palette du bas, en la faisant lever de même de 27°, et son bras IK est porté en I*f* vers le fond de la figure et au delà de la branche W de manivelle, point où la roue se trouve de même arrêtée par le rebord de cette palette. C'est alors que le balancier, dans son retour de l'arc de supplément précédent, ne rencontre le bras de la verge du bas qu'en *f* ; et déjà avancé de 27° au delà de son repos, ce bras est porté alors plus loin (en dégageant cette palette de la dent de la roue), par l'arc de supplément en sens opposé à celui expliqué ci-dessus, pour revenir et recommencer ses effets sur le bras et la palette du haut. (NOTA. *Les tours inférieurs du spiral* tt *doivent passer en avant de la tige* CA.)

On voit que, dans le retour des arcs de supplément, le balancier est animé de la force de deux spiraux, du sien propre et de celui de chaque verge, tandis qu'en commençant chaque arc de supplément, il a trouvé le bras de chaque palette déjà avancé de 27° par la

seule action de la roue et de la force motrice ; il s'ensuit qu'il a un surcroît de force dans son retour, surcroît employé à balancer la résistance de ses propres frottements, c'est-à-dire ceux de ses pivots et de la verge qu'il mène, ainsi que la résistance des spiraux, de manière à s'entretenir en vibration. Et comme les arcs de supplément parcourus par le balancier ne sont plus sous l'influence de la force motrice, l'échappement se trouve dans le cas de ceux appelés *libres* ; comme aussi, les 27° de levée produits uniquement par la force motrice et qui occasionnent le surcroît de force dans les retours du balancier, forment *remontoir*, vu que les deux spiraux des verges renouvellent suffisamment la puissance du balancier, à chaque retour d'une oscillation.

Mais avec tous les avantages apparents de ce mécanisme ingénieux et compliqué, il y a pour chaque oscillation du balancier le frottement de quatre pivots en mouvement à la fois, la résistance de deux spiraux, le décrochement des palettes, des contacts avec séparation perpendiculaire, toutes causes de variation qui paraissent avoir fait renoncer à l'emploi ultérieur de cette composition.

Dans la figure de *Berthoud* la roue d'échappement a la forme ordinaire d'une roue de rencontre, sauf que le devant des dents est droit et parallèle à l'axe de la roue, au lieu d'être incliné ; mais dans la figure de *Mudge*, les dents sont inclinées et formées de deux lignes droites convergentes vers la pointe des dents. Sa gravure indique aussi des palettes à rebord formées en pierre dure et rapportées dans des chapes. Les pivots du balancier avec sa manivelle roulent en haut et en bas entre trois rouleaux dans leur cage particulière. On conçoit que le balancier doit être aussi compensateur de la température ; mais ces différences de figure ne changent rien au principe de composition. On voit du reste que les supports à ménager aux quatre pivots des verges, avec les autres détails, multiplient beaucoup ici ceux de la main-d'œuvre.

1214. En développant précédemment la construction du baromètre et du thermomètre, nous avons eu pour but de faciliter en même temps la connaissance de l'emploi du mercure, qui se présente parfois parmi les moyens d'assurer la régularité de la mesure du temps. Nous avons remarqué ailleurs que *Graham* l'avait employé avec succès pour la compensation du pendule ; et l'on ne doit pas oublier qu'il servit heureusement à *P. Leroy* pour la compensation du balancier de sa Montre marine. La disposition du thermomètre de *Berthoud* donnerait assez la représentation du moyen de *P. Leroy*, si la place occupée dans *Berthoud* par l'alcool était réservée au mercure, en substituant l'un à la place de l'autre. La construction beaucoup plus délicate de *P. Leroy* était trop fragile, et la décharge simultanée des deux batteries de tribord et bâbord du vaisseau où sa pièce fut éprouvée fit rompre un de ses deux thermomètres compensateurs. Mais la dilatation et la condensation du mercure paraît plus assurée dans ses résultats que celle des lames bimétalliques, sujettes à se fatiguer et à ne pas faire suivre, au déplacement des masses du balancier, la progression des degrés extrêmes de la température sur toute la machine. Il eût été sans doute facile à *P. Leroy* de modifier sa construction et de la garantir ; mais cet artiste de talent, qui avait obtenu deux prix doubles, se voyant négligé, par suite de la préférence donnée indiscrètement à *Berthoud* seul, pour tous les travaux de la marine,

abandonna ses recherches, au grand regret de ceux qui les apprécient mieux aujourd'hui (1).

1215. Quant au thermomètre à cadran de *Berthoud*, il comporte toute l'inexactitude de son baromètre à cadran, et l'usage de la soie, de la poulie, des cordes et des contre-poids, qui peuvent suffire pour un meuble de décoration, ne serait pas admissible aujourd'hui parmi les instruments de précision employés dans les expériences modernes soumises au calcul mathématique, et exigeant bien plus de rigueur qu'on n'en portait alors dans les arts et les sciences physiques. Nous opposerons donc au thermomètre de *Berthoud*, déjà donné, celui composé d'une lame bimétallique cité et augmenté par *Jurghensen*, et nous décrirons ici celui fait dans les derniers temps par *Frédérick Hourriet*, au Locle, comté de Neufchâtel, comme plus simple et plus portatif (2). Cet instrument peut être exécuté par tout Horloger soigneux dans sa main-d'œuvre, et l'usage en est utile dans bien des expériences concernant l'Horlogerie.

1216. Une platine unique de 27 lignes de diamètre, fig. 3, pl. XXXII, porte une lame courbe bimétallique *a b c* ployée à demeure en forme dite de *fer à cheval*, soutenue solidement et uniquement par sa patte *a* fixée à la platine par une forte vis et deux pieds bien ajustés. Cette lame est maintenue de champ et isolée de la platine, dont elle n'est éloignée que d'un quart de ligne sur toute sa longueur d'environ cinq pouces, si elle était mesurée droite; elle a environ deux lignes de largeur auprès de la patte en diminuant un peu vers son extrémité libre; son épaisseur, d'une demi-ligne auprès de la patte, se réduit insensiblement de là à un tiers de ligne vers l'autre bout. Elle est appelée *bimétallique*, parce qu'elle est composée d'une lame d'acier trempée et revenue *bleu*, et d'une lame de laiton, soudées ensemble à l'étain: l'épaisseur de l'acier est environ les 2/5es, et celle du laiton les 3/5es du tout. Sa forme en fer à cheval lui permet d'être maintenue sur la platine sans toucher aux parois de sa boîte en forme de montre.

1217. Un râteau *d* avec axe et pivots est établi sur un rayon vertical du haut; le pivot inférieur roule dans la platine, et le supérieur dans le pont *e*. La partie du râteau placée vers le pendant de la boîte, et que nous nommerons le bras, est une tige droite,

(1) Les étrangers instruits et amateurs, moins exposés aux préventions que les indigènes, s'étonnent de ne trouver en France presque aucune trace des travaux de *Pierre Leroy*, qu'ils placent dans leur estime au-dessus de *Berthoud*. On ne voit, en effet, chez nous ni portrait, ni notice biographique, ni produits conservés de cet homme de génie, fils de *Julien*, l'un et l'autre si remarquables par leur rare mérite. Cela n'étonnera pas néanmoins ceux qui connaissent le défaut de nationalité qui nous est si justement reproché par le grand *Frédéric* dans ses lettres à *Voltaire*.

(2) Cet artiste ne s'est pas borné à produire de bonnes et belles pièces à l'usage civil, il a aussi exécuté de bons *chronomètres* de poche; il a laissé des héritiers de son talent et quelques mémoires manuscrits adressés à l'une des premières Académies de l'Europe. Le dernier resta sans rapport, et ce n'était pas qu'il n'en méritât bien!... *Fréd. Hourriet* avait imaginé les spiraux sphériques, et a laissé parmi les artistes une mémoire honorable, malgré des menées sourdes et clandestines justement relevées dans quelques écrits du temps, par un autre artiste contemporain bien plus capable que les ignorants détracteurs d'*Hourriet*. Les spiraux sphériques d'*Hourriet* présentaient une certaine difficulté pour la trempe; je lui dis un jour, à ce sujet, que le *moule* qui les assujettissait était probablement construit de plusieurs côtes de rapport, qui sortaient ensuite séparément par un des pôles de la sphère, après qu'une clef centrale en était retirée. « Quand cela serait vrai, me répondit-il en souriant, je ne serais pas obligé d'en convenir, puisque ce serait mon secret. » Nous allâmes déjeuner. et il n'en fut plus question. (*Note de l'Éditeur.*)

de forme carrée portant une boîte percée de deux tubes carrés, l'un au-dessus de l'autre et à l'équerre entre eux, dont l'un est fixé sur le bras du râteau au moyen d'une vis de pression, tandis que l'autre reçoit une tige d'acier fixée de même par une vis, et que nous nommerons le T, en raison des deux bras courbes qu'elle porte, c'est son bord convexe qui touche la lame bimétallique. Ces bras du T forment une courbe *tâtée* figurant un bout d'ovale dont le petit diamètre, vertical ici et parallèle au bras *a b*, serait environ moitié de son grand diamètre. Le limbe du râteau est divisé en 36 dents très-fines engrenant bien librement avec le pignon de 28 ailes planté au centre de la platine; le pont *e* reçoit le pivot supérieur, tandis que l'inférieur, prolongé comme celui d'une roue qui, dans une Montre à secondes, en porte l'aiguille, traverse de même ici la platine, et arrive très-peu au-dessous de la surface du cadran; il y est reçu à frottement dur dans le canon de l'aiguille longue, légère et bien équilibrée qui parcourt les divisions du cadran, vu fig. 4, même pl. XXXII.

1218. Le cadran d'émail, presque plat, est maintenu et centré exactement sur une légère *bâte-levée* de la platine par 3 pieds *p r s* sans goupilles, vu qu'il est retenu en place par la saillie intérieure du drageoir pour le cristal, drageoir faisant partie de la boîte qui n'a point de lunette ouvrante; mais, avant de placer le cadran, on monte sur le long pivot de l'aiguille une virole fendue et à ressort, comme celle du spiral d'un balancier de Montre; cette virole est garnie aussi d'un spiral à tours multipliés et de force seulement suffisante pour faire appuyer légèrement le T du râteau contre le laiton de la lame bimétallique *dont la partie en acier est en dehors*. Ce spiral n'est guère armé que d'un tour et demi, lorsque l'aiguille est sur zéro glace, ce qui a lieu au moyen d'un piton ordinaire de spiral, fixé sous le cadran à la platine, et dont le tenon paraît en *m;* la bâte-levée laisse assez de vide pour contenir la virole, le spiral et son piton, bien isolés du cadran.

1219. La platine portant l'ensemble de ce petit mécanisme, avec son cadran et son aiguille en place, s'introduit dans la boîte par le côté de sa cuvette, pour que les bords du cadran puissent s'appuyer contre le drageoir du cristal. Une languette ou tenon peu saillant au bord inférieur de la platine, en *i*, se loge dans une creusure intérieure du collier de la boîte, et deux vis-clefs opposées *g* et *h*, logées de même, retiennent le tout en place. La boîte en argent, forme de collier, entre deux légers filets, est très-mince dans toutes ses parties, pour être pénétrée plus facilement par la température ambiante. Le fond est un peu bombé en dehors, de même courbe que le cristal, ce qui laisse à l'aiguille, comme aux parties intérieures, la place suffisante à leur isolement. *Ce Thermomètre portatif, placé dans une poche de montre, convient aux Horlogers.*

1220. La position du T est aussi tâtée d'après sa courbe et au moyen des deux coulisses ou boîtes indiquées ci-dessus, pour obvier à la décomposition du mouvement de l'extrémité de la lame, afin que l'aiguille suive la graduation des meilleurs thermomètres à mercure, même avec tube calibré, pendant deux tours au plus du cercle de Réaumur de 80°, ce qui permet d'y reconnaître une température de 160° de chaud, et, moyennant la 1re bande du spiral, plus de 60° de froid qui suffisent aux expériences ordinaires. L'é-

preuve de l'instrument poussée plus loin pourrait dépasser la latitude d'élasticité métallique de la lame composée; l'aiguille alors ne reviendrait pas juste au point de départ pour le même degré de température qui l'y maintenait d'abord, et son zéro-glace serait changé. Du reste, pour des températures plus élevées au-dessus de zéro-glace, on emploie d'autres thermomètres spéciaux, tels que celui d'*Athwood* pour la chaleur et autres, car un trop haut degré de chaleur volatiliserait le mercure comme tous les liquides, et briserait l'enveloppe de verre qui les contient.

1221. Le cadran de Hourriet porte une double division; l'intérieure plus espacée est l'échelle de *Réaumur*, dont 80° occupent le cercle entier (1). La division extérieure plus serrée est celle de *Fareinheit*, ancien physicien de *Dantzig*, usitée en Angleterre, et dont 180° occupent ici tout le cercle extérieur, mis en correspondance avec celui de Réaumur. Dans la division Fareinheit le zéro-glace est reculé à 32° plus bas que le zéro-glace de Réaumur, qui est aussi celui de 80° ou d'ébullition, après un tour du cadran. Ainsi le zéro Fareinheit est plus bas de 32° que la simple congélation naturelle de l'eau. Cette distribution paraît due aux expériences de la plus forte congélation *artificielle* de l'eau, à cette époque, au moyen des procédés chimiques les plus puissants que l'on connût alors, et que l'on considérait à tort comme la limite du plus grand froid. Mais, depuis, les procédés modernes ont pu produire jusqu'à 50°, 60° de froid, et même plus. Du reste, ces procédés ayant plus ou moins d'intensité suivant la qualité des matières employées et les variétés inévitables du mode d'opération, ils ne peuvent donner de terme fixe et comparable d'un pays à un autre, pour une même échelle thermométrique. Il est généralement reconnu que la glace fondante, d'une part, et de l'autre, l'ébullition de l'eau distillée, celle-ci sous une égale pression de l'atmosphère, convenue et connue par le baromètre (27 pouces en plaine), sont des points fixes sur toute la surface terrestre, comparables entre eux, et sur lesquels la température propre du lieu n'influe pas. Cette méthode fondamentale est connue depuis très-longtemps de tous ceux qui ont suivi un cours de physique, et de tous les ouvriers qui s'adonnent à la construction des thermomètres (2).

1222. Un seul degré *Fareinheit* n'équivaut qu'à 8/18 ou 4/9 d'un degré *Réaumur*, ou, autrement dit, un degré Réaumur vaut 2 degrés 1/4 *Fareinheit*.

(1) Dans quelques épreuves de la planche 32, entre la division coïncidant au pendant et le mot *Réaumur*, on trouve marqué 90°, c'est une erreur de gravure, il faut y lire 80°, cette même division doit aussi porter dans le cercle même son 0° glace, point de départ, de figure semblable au zéro Fareinheit. Ces deux fautes dans la division Réaumur ont été corrigées depuis; le même trait vis-à-vis du pendant correspond à 0 glace, et ensuite à 80° d'ébullition Réaumur, lorsque l'aiguille, à partir de zéro glace, a fait un tour du côté du *chaud*.

(2) Le moyen de la glace fondante est d'autant plus facile, que la température de l'eau de glace devenant fluide se conserve uniformément, tant qu'il reste dans cette eau quelques morceaux de glace à fondre, laquelle absorbe tout le calorique que l'eau peut acquérir; en sorte qu'il suffit d'ajouter de temps à autre quelques autres morceaux de glace à fondre pour prolonger le degré zéro de la température de cette eau. Cet effet est le même aux pôles comme sous la ligne équinoxiale, et s'explique fort aisément en physique. Nota. La glace doit être concassée en petits morceaux qui touchent au réservoir du thermomètre, et la colonne de celui-ci doit être plongée dans l'eau jusqu'à la hauteur du fluide qu'elle contient.

On pourrait encore ajouter sur le même cadran un cercle intérieur portant la division *centigrade* plus moderne, et qui n'était pas encore admise généralement au temps de feu Hourriet père, constructeur de l'instrument que nous décrivons. La division *centigrade* compte, comme son nom l'indique, 100° entre la congélation naturelle de l'eau à zéro-glace, et l'ébullition de cette eau avec les conditions ci-dessus. Ce nombre de divisions étant plus grand de son propre cinquième, que celui de la division en 80° de Réaumur, il en résulte que 5° centigrades n'équivalent qu'à 4° Réaumur, et que, si l'on veut convertir un nombre de degrés centigrades en degrés Réaumur équivalents, il suffit de retrancher le 5e des degrés centigrades; le reste exprimera l'équivalent des degrés de Réaumur.

Si, au contraire, on veut convertir ou exprimer un nombre de degrés Réaumur en degrés centigrades, il faut augmenter la somme des degrés Réaumur de son propre quart en sus; alors le total de l'addition exprimera, par exemple, que 4° Réaumur équivalent à 5° centigrades.

Si l'on veut comparer l'échelle centigrade à celle de Fareinheit, il suffira de remarquer que la division totale du cadran en 100° centigrades embrasse 180° Fareinheit, ou que 10° centigrades équivalent à 18° Fareinheit; et que, par suite, 1° Fareinheit ne représente que les 10/18 ou les 5/9 d'un degré centigrade, ou bien que 1° centigrade vaut 1° + 8/10 ou + 4/5 de Fareinheit; tel est le rapport entre ces diverses échelles; et ces exemples sur de petits nombres peuvent servir de guides pour l'application à d'autres nombres plus chargés.

1223. Nous venons d'indiquer (1221 et note 2) l'emploi de la glace fondante pour fixer constamment le terme zéro-glace; nous avons dit que ce phénomène s'explique par la propriété dans les morceaux de glace d'absorber tout le calorique au-dessus de glace, que l'eau acquiert des corps environnants plus chauds, tant qu'il reste de la glace à fondre. Pour compléter cette matière et ne rien laisser à désirer, nous ajouterons que cette propriété paraît provenir, d'une part, de l'attraction entre les corps froids et le calorique, et de l'autre, de la tendance du calorique à s'équilibrer dans les corps, deux expressions au fond du même principe établi par diverses expériences de physique; quant à l'autre terme, celui de l'ébullition, il se détermine en plongeant le thermomètre, avec toute la partie de sa colonne de fluide dilatable, dans l'eau filtrée, ou mieux distillée, qui remplit un vase de métal, semblable à celui qu'on appelle cafetière du Levant, de 8 à 10 pouces de hauteur (suivant l'élévation présumée de la colonne du fluide), et de 4 à 5 pouces ou plus de diamètre vers le ventre du vase. La boule ou réservoir du thermomètre doit être plongée jusqu'à environ un pouce et demi du fond et maintenue, ainsi que le tube, en situation verticale au milieu du vase. On place le vase sur le feu lorsque le baromètre se soutient à sa hauteur moyenne de 27 pouces en plaine, pendant un état présumé assez constant de l'atmosphère, c'est ainsi que *Deluc* le propose. Quelques-uns pensent qu'un vase plus étroit, contenu dans un second vase plus grand dont on ferait bouillir l'eau, permettrait plus aisément de remarquer la hauteur de la colonne de l'instrument, vu que l'eau du second vase intérieur échauffée dans ce *bain-marie*, ne peut bouillir, quoique

pénétrée du même degré de chaleur. On peut voir, sur ce sujet, les divers traités de physique, et notamment les *Recherches* sur les modifications de l'*atmosphère*, traitant du baromètre et du thermomètre, par Deluc, Genève, 1772, 2 vol. in-4°; ou le savant Recueil de plusieurs questions de physique expérimentale et mathématique, par M. Biot père, Paris, 1816, 4 vol. in-8°, etc.

1224. Les thermomètres construits avec le mercure ou l'alcool ou d'autres fluides, ont un défaut : c'est que l'enveloppe de verre qui en forme le réservoir, en boule, en spirale ou en cylindre droit, étant mise en contact avec des corps plus chauds, par exemple, que l'instrument, cette enveloppe se dilate la première et devient ainsi d'une plus grande capacité avant que sa masse de liquide ait été pénétrée entièrement; la colonne indicatrice commence donc par baisser au lieu de s'élever jusqu'à ce que la masse étant assez pénétrée, excède par sa dilatation l'effet de celle du réservoir, et que la colonne ait repris sa marche dans son vrai sens. Une température dans les corps éprouvés, plus basse que celle de l'instrument, produit conséquemment l'effet contraire. Ce retard du premier instant dans l'effet attendu devient un inconvénient lorsqu'il s'agit de constater le développement momentané et souvent peu intense du calorique, qui se trouve ensuite absorbé presque aussitôt par les corps ambiants. Cette sorte d'hésitation des thermomètres ordinaires n'a pas lieu avec les thermomètres bimétalliques, dont la lame toujours mince et délicate agit immédiatement dans son vrai sens. Du reste, c'est à l'observateur de choisir l'instrument le plus convenable au sujet qu'il étudie.

1225. L'un des instruments les plus sensibles aux légers changements de température est le *thermomètre d'air :* il est formé comme les autres d'un long tube de verre horizontal, terminé par une boule mince de même matière, mais plus grande que d'ordinaire, et uniquement remplie d'air atmosphérique; ce fluide éminemment dilatable, contractile et élastique, y fait avancer ou rétrograder une simple gouttelette d'eau placée vers le milieu du tube; mais cet instrument très-fragile ne convient pas pour de grandes différences de température qui exigeraient une trop grande longueur de tube, fort incommode, et qui ne pourrait souvent trouver sa place dans certains appareils (1).

1226. Le thermomètre le plus parfait dont nous ayons connaissance, et qui convient le mieux à un cabinet de physique, mais dont l'exécution exige une rare habileté de main-d'œuvre jointe à l'intelligence des principes et des conditions rigoureuses de cet instrument délicat de météorologie, est celui composé par M. *Winnerl* à Paris, habile constructeur de *Chronomètres* pour la marine, comme pour le *porter*. Le mécanisme de son thermomètre est contenu dans une boîte métallique plate, de 3 pouces à peu près de diamètre cylindrique sur environ 6 lignes de hauteur. Elle est entièrement ouverte du haut, et les parois comme le fond de cette espèce de disque vide, sont excessivement

(1) Nous ne parlerons pas ici d'un autre thermomètre métallique fort sensible, mais dont la construction trop imparfaite n'a pas permis l'usage général. Entre plusieurs défauts majeurs, sa division arbitraire et fausse exige une échelle particulière de comparaison, spéciale à chacun de ces instruments, qui ne sont pas même *comparables* entre eux; l'auteur ne connaissait pas son sujet (N. de l'Ed.)

minces, pour éviter d'autant l'absorption du calorique instantané. Une lame bimétallique y fait indiquer les degrés de calorique par une première aiguille principale délicatement suspendue, sur un limbe étroit et mince porté par le bord du disque. Deux autres aiguilles légères, indépendantes des effets de la lame, mais concentriques à la première, sont conduites par celle-ci, l'une aux *maxima*, l'autre aux *minima* de température, points où chacune peut rester à volonté, au moyen d'une roue très-légère, dont le limbe est taillé sur son bord en rochet d'une finesse à peine perceptible; ces deux roues sont maintenues séparément à leurs points de progression par un encliquetage de la plus grande légèreté, avec dégagement au besoin. Le disque est élevé et comme isolé sur trois supports délicats, fixés à une base générale solide. Ces supports soutiennent un demi-globe de cristal, propre à garantir habituellement les principales parties de l'instrument de la poussière tombante, tout en laissant par le bas un libre accès à l'air ambiant. L'hémisphère de cristal peut être enlevé pour certaines expériences. La sensibilité de cet appareil surpasse de beaucoup celle des meilleurs thermomètres de mercure ou d'alcool. Le premier instrument de ce genre fait par M. *Winnerl* fut acquis par M. *Schumacher*, et ce savant astronome, directeur du bureau trigonométrique de Danemark, l'ayant fait connaître à plusieurs physiciens et astronomes, le feu roi de Prusse en fit demander un semblable, et sans limitation de dépense, à l'auteur, qui alors en exécuta deux à la fois, dont un, étant encore à sa disposition, nous a mis à même de connaître cet instrument si remarquable par son exécution soignée, sa précision, et l'intelligence des vrais principes qui en ont dirigé la composition.

1227. Divers rapports des membres du conseil d'administration de la Société d'encouragement à Paris ont constaté plusieurs perfectionnements importants que M. *Winnerl* a pratiqués, soit dans les Pendules d'observation, soit dans celles à l'usage civil, ainsi que diverses constructions ingénieuses et solides de *Compteurs des secondes*. On en trouve les dessins gravés par ordre du conseil d'administration dans les derniers mémoires de cette société si utile aux sciences et aux arts, et qui compte dans son sein des savants, des amateurs très-instruits et des artistes de premier ordre. Les rapports en ont été parfaitement rédigés par un amateur très-versé, non-seulement dans la théorie, mais même en pratique, et en état de mettre au besoin, comme on dit, la *main à la pâte*, ce qui est beaucoup trop rare actuellement. Nous nous proposons de revenir avec plus de détail sur ces articles, lorsque nous traiterons spécialement ce sujet, et nous citerons aussi alors plusieurs autres artistes distingués.

Feu *Ferd. Berthoud* avait supprimé la fourchette dans une Horloge à demi-sec. projetée, et sans exécution; il y renonça. Ailleurs la fourchette s'est trouvée supprimée par nécessité de construction et sans plus de succès; aussi cet avantage réel, mais alors méconnu par les auteurs, ne fut-il pas répété dans leurs ouvrages postérieurs; mais M. *Winnerl* en a obtenu la suppression de deux pivots, de l'ébat sur la tige du pendule, et, à levée égale, des oscillations plus étendues, avec une marche supérieure.

Feu M. *Savarry*, de l'Académie, etc., voulant réaliser une pensée de M. *Leroy* de

Montpellier sur un nouvel hygromètre, en confia la construction délicate à M. *Winnerl*, qui la composa avec tant de succès, que M. *Savarry* se proposait de publier, avec le nom du premier inventeur, celui de l'artiste qui avait si heureusement saisi la question. Il s'agit ici d'une lame bimétallique d'or et platine fondus ensemble, renfermée sous le double fond d'une capsule de platine très-mince. Une ouverture latérale oblongue donne accès à l'air et à la vue sur la surface polie de l'or. Quelques gouttes d'éther versées dans le godet supérieur refroidissent le tout en s'évaporant, et l'air dépose son humidité sur l'or, dont la tache momentanée disparaît lorsque la lame a repris la température ambiante. Une première aiguille marque le minimum de température auquel la vapeur se précipite, et une deuxième aiguille, stationnaire à volonté, peut en conserver le degré. Cet appareil ingénieux a été légué par M. *Savarry* à M. *Laugier*, membre de l'Observatoire et de l'Institut.

1228. Nous avons déjà renvoyé, dans l'un de nos paragraphes précédents (1211), aux Mémoires de la Société d'encouragement, pour les perfectionnements modernes de l'Horlogerie; mais tous les progrès de l'art ne se bornent pas aux articles publiés. Il y a en France d'autres artistes très-capables, à qui leurs occupations pressantes n'ont pas permis les démarches nécessaires pour se faire connaître, et qui possèdent plus ou moins de talent. Outre les articles d'Horlogerie de M. Destigny père, habile Horloger de *Rouen*, consignés déjà dans les Mémoires de la Société d'encouragement, cet artiste, membre de la Société d'émulation de Rouen pour les sciences et les arts, nous a communiqué récemment les dessins et gravures d'un nouveau pyromètre propre à faire connaître les degrés de dilatation que la température produit sur divers corps pierreux, sur les marbres, etc., comparés à son effet sur les métaux. Nous en donnerons à la fin de ce volume la table, utile non-seulement pour les constructions des bâtiments, mais aussi pour apprécier en mécanique l'effet des supports en pierre ou en marbre sur les machines de précision. L'auteur, qui s'est également livré aux travaux délicats de la Montre, nous a fait voir aussi sa construction ingénieuse d'un compensateur *modifiable* suivant le besoin, et appliqué aux spiraux du balancier de belles et solides Montres de poche de sa composition. Les recherches minutieuses en tout genre trouvent dans les moyens précis de l'Horlogerie l'application la plus délicate de la plupart des connaissances humaines.

1229. Il n'y a pas longtemps que les journaux citaient une fête publique d'inauguration à l'occasion des réparations fondamentales faites à l'ancienne et célèbre Horloge de *Strasbourg*, par l'habile et savant artiste M. *Schwilgué* dont les talents s'étendent également au travail délicat de la Montre. Plusieurs Horlogers capables de Paris ont pu voir entre les mains de M. Rugienn', digne élève de l'habile artiste de Strasbourg, de belles pièces de ce genre parfaitement exécutées et qui font honneur au maître comme à son disciple. Il paraît même que les travaux actuels faits à l'ancienne Horloge dont il s'agit, ne se sont pas bornés à des réparations, mais que presque toute la machine usée, et entachée primitivement de la mauvaise exécution de l'époque de son origine, a été presque toute refaite et augmentée par M. *Schwilgué*.

1230 (1). Des premiers essais d'Horlogerie ont servi à améliorer la serrurerie soignée de l'habile artiste Huret, dont les inventions mécaniques et fermetures de combinaison si commodes sont assez connues. L'instruction de cet artiste a commencé par celle de l'Horlogerie, et l'on pourrait faire la même observation dans nombre d'articles usuels, aussi justement que nous l'appliquons à tous les artistes distingués qui s'occupent d'instruments de précision, ainsi qu'à l'habile ingén. actuel de nos instrum. d'astronomie.

1231. L'art d'imiter les mouvements de l'homme et ceux des autres animaux, dans ces ingénieux produits de la mécanique qu'on appelle *automates*, vient encore à l'appui des vérités précédentes. Les automates du Français *Vaucanson*, du Suisse *Jacquet-Droz*, et autres, ont étonné dans leur temps toute l'Europe; mais ils n'étaient exécutés en grande partie qu'avec du bois, du fil de fer et autres matières peu solides, peu susceptibles de conservation et d'exactitude; ils exigeaient des réparations continuelles. Si l'on voit aujourd'hui des ouvrages de ce genre incomparablement plus parfaits dans leurs mouvements, et plus durables, c'est encore à l'Horlogerie qu'il le faut attribuer. L'artiste habile et extraordinaire en ce genre, qui s'en occupe exclusivement à Paris, et presque le seul en Europe, M. *Robert-Houdin* est aussi un excellent Horloger. Les amateurs et curieux de toutes les classes de la société ont vu chez lui les scènes gracieuses et richement décorées, et les mouvements si parfaitement rendus, de ses figures mouvantes qui escamotent, dansent sur la corde, ou répondent par signes, dessins ou écriture aux questions des amateurs. L'auteur joignant à sa rare habileté une patience et une adresse surprenante, modèle lui-même les parties visibles de ses personnages et les habille avec goût, propreté et dextérité. Tout est raisonné et en accord dans ses riches compositions. Leur mécanisme intérieur est exécuté comme celui d'une excellente Pendule. Cependant ces mouvements, insolites dans les machines ordinaires, présentent de bien plus grandes difficultés, lorsqu'il s'agit de reproduire des actions naturelles si variées, modifiées et nuancées en tous sens. Leur auteur ne néglige pas toutefois l'application directe de ses talents à la mesure propre du temps, et exécute d'excellentes pendules simples. Mais la plupart du temps, il en dispose le mécanisme d'une manière si adroite et si ingénieuse, qu'à plusieurs de nos expositions publiques, les premiers Horlogers ses confrères ne pouvaient deviner les communications cachées de certaines Pendules dites *mystérieuses*, où étaient observés, du reste, les principes des meilleurs ouvrages à l'usage civil. Son cabinet en contient plusieurs d'une disposition toute différente de l'usage, sans en être moins bonnes ni solides. Telle est entre autres sa Pendule en forme de pilastre allongé en hauteur, et qui porte pour indicateur la figure du soleil s'élevant progressivement sur la division en ligne verticale de ses douze heures, pour en descendre tout à coup au point de midi, et reprendre sa même marche ascendante sur la première heure qui suit; deux rosaces du haut et du bas y contiennent des cadrans circulaires pour les minutes et se-

(1) Nous venons de visiter en ce moment, sur le boulev. Bonne-Nouvelle, n° 10 près la p. St-Denis, une Horloge à fig. mouv. et révol. astron. dans le goût de l'anc. de *Strasbourg*, qui excite justem. l'attention des curieux et même des Horlogers, comme production d'un jeune pâtre du *Tarn*, nommé *Sieurac*, aussi intéressant par son intellig. mécan. et son ingénuité, que par sa const. à vaincre les difficultés de sa position.

condes. Cette pièce a pour pendant un baromètre de même forme et proportion : ces deux machines peuvent décorer agréablement et d'une manière nouvelle les côtés d'une glace ou trumeau de cheminée.

Parmi les Pendules *mystérieuses* du même auteur, quelques-unes ont leur cadran en glace transparente, uniquement garni de ses aiguilles isolées à l'œil, sans que des artistes, même expérimentés, puissent apercevoir, ni dans cette partie, ni dans les supports de cristal, les moyens de communication entre le socle qui contient le *mouvement* et les aiguilles isolées sur la glace du cadran. On a déjà vu des Pendules à glace d'une autre espèce, dont l'aiguille était mise en mouvement par une masse mobile, cachée dans la queue volumineuse de cette aiguille; la progression de celle-ci n'était due qu'au rapprochement périodique d'une masse équilibrante, au moyen d'un gros mouvement de Montre, effet très-anciennement connu, et qui ne s'est fait remarquer que parce qu'il était oublié depuis longtemps; il l'est encore aujourd'hui, faute de pouvoir permettre un bon réglage. Or les Pendules à glace de M. Robert-Houdin sont établies sur un tout autre principe, et sont aussi solides et parfaitement réglées, vu leur bonne construction, que les meilleures Pendules ordinaires.

L'artiste que nous citons a composé aussi des Réveils ingénieux de petite dimension et très-portatifs, qui allument une bougie à l'instant de la sonnerie; d'autres plus ou moins recherchés facilitent la détermination de l'heure de réveil, etc., et ces Réveils sont d'un prix très-économique; il a aussi imaginé des sonneries de Pendule sans repères, et qui se raccordent d'elles-mêmes, au besoin, avec les aiguilles, etc. *L'auteur ne confie à personne l'exécution de ses costumes, décors et peintures.*

On avait remarqué, il y a peu de temps, un des derniers *automates* de M. *Robert-Houdin*, son écrivain dessinateur répondant à des questions : l'auteur vient d'exécuter pour pendant à cette figure, celle de la *Leçon de chant* donnée par une femme d'une mise élégante à un très-petit oiseau juché sur un perchoir d'appartement. La femme de 10 à 12 pouces de proportion est assise et fait jouer une serinette de dimension analogue. La leçon de la serinette répétée par le petit volatile est accompagnée du battement naturel des ailes, et des vibrations du bec suivant la notation de l'air ; on y distingue les modifications sonores qui distinguent les sons de l'instrument de la voix de l'animal, et toutes les hésitations d'un élève mêlant d'abord son ramage à sa leçon, et finissant par répéter purement l'air entier, etc., etc. Nous n'entrons ici dans ces détails que pour indiquer en gros avec quels soins ces effets sont étudiés ; et nous finirons par l'observation générale que les compositions de ce genre, que les amateurs ont pu remarquer depuis quelques années parmi les collections de curiosités, sont de la main de M. *Robert-Houdin*, dont le nom a été quelquefois supprimé par des motifs de commerce. *L'oiseau cité a été très-délicatement emplumé par l'auteur.*

1232. Si nous avons donné plus haut tant d'extension au principe du baromètre et du thermomètre, c'était pour faire suite aux premières notions de physique générale qui trouvent si souvent leur utile application lorsqu'il s'agit d'innover ou même seulement de perfectionner ce qui est déjà connu. Plusieurs connaissances sont indispensables en

pareil cas, comme aussi pour bien saisir l'esprit des nouvelles compositions qui peuvent se présenter. Le secours d'une instruction étendue peut seul permettre d'y reconnaître ce qu'on appelle trop généralement du *génie*. Car il ne faut pas prodiguer cette qualité à ceux dont l'ignorance hasarde des productions nouvelles, produits accidentels de tâtonnements aveugles ; l'ambition de se faire remarquer, et de passer pour *inventeur*, ne mène souvent qu'à des essais sans bases ni principes, qui ne constituent point de véritables progrès. Et pour prendre nos exemples encore plus haut, si des savants et des artistes tels que les *Bacon*, les *Newton*, les *Huyghens*, les *Graham*, n'avaient pas possédé des connaissances préalables en physique, en mathématiques, en mécanique, etc., leur vrai *génie* n'aurait pas reculé de leur temps, comme on l'a vu, les bornes des sciences et des arts. L'ignorant s'égare d'autant plus dans des recherches hors de sa portée, qu'il est plus éloigné de s'en douter. « Le savant, dit Fon« tenelle, cherche et s'enquiert encore ; mais l'ignorant ne sait pas même de quoi « s'enquérir; » et si par hasard ce dernier rencontre juste une fois sur mille, ne connaissant pas la cause de son succès éphémère borné fortuitement à un cas particulier, il n'en peut déduire des règles généralement utiles, et ne sait pas même en tirer tout le parti que comporte son sujet. Trop souvent, les écarts d'une imagination active, mais ambitieuse, faute d'être appuyés sur les principes d'une instruction solide, qui lui serviraient comme de jalons dans une route nouvelle, s'ils étaient accompagnés du talent de rapprocher habilement des conséquences jusqu'alors inaperçues, de tels écarts, disons-nous, ressemblent à ces spéculations d'une audace avide qui réussissent si peu dans les jeux de hasard, et qui presque toujours fausses et erronées ne conduisent qu'à leur ruine ceux qui s'y livrent aveuglément ; c'est aussi le sort de la plupart des inventeurs. Ce n'est pas que nous voulions ici rejeter ce qu'on appelle l'esprit inventif; mais nous disons seulement que le succès des meilleures inventions tient à l'instruction du sujet, ou n'est qu'un accident fortuit sur lequel l'ignorance ne doit pas plus compter que sur les chances d'une loterie, et l'on sait assez combien le sort y est perfide.

1233. Quant aux essais de compositions mécaniques, il faut être en état d'y pressentir à très-peu près et d'avance les nouvelles conséquences au moins probables de principes isolés ailleurs, mais constatés. Nous entendons ici qu'il faut, non pas posséder les principes de toutes les sciences, mais avoir du moins les premières notions de celles analogues au sujet. Pour entreprendre seulement d'améliorer, il faut connaître tout ce qui a été fait de mieux dans le genre, et comment, pourquoi, ce premier mieux a été obtenu. Pour apprécier les causes physiques, mécaniques et mathématiques, il faut en avoir ces premières idées qui en permettent au besoin les recherches. C'est pourquoi nous tendons à ajouter de temps en temps aux notions que nous avons essayé d'introduire dans cet ouvrage ; car l'Horlogerie actuelle ne peut plus se soutenir que par l'imitation des bons modèles, ni faire d'importants progrès ultérieurs, qu'à l'aide d'une haute instruction physico-mathématique, jointe à une pratique très-habile(1).

(1) La feuille 15ᵉ suivante de ce 2ᵉ volume commençant le chap. IV qui traitera des principes et de la méthode pratique la plus régulière pour établir les meilleurs engrenages, nous allons terminer cette

Nous avons déjà fait remarquer que peser, mesurer, comparer, étaient les bases de nos connaissances physiques. Les rapprochements, l'analogie, et les conclusions bien déduites des propriétés connues de la matière (conclusions soumises toutefois à des expériences exactes), constituent le reste de la science. La capacité de l'esprit pour des rapprochements savants, entre divers points des sciences et des arts, mérite alors le titre de *génie :* ces dispositions d'un esprit cultivé par l'étude obtiennent alors justement ce titre, qui n'appartient point aux tâtonnements même heureux de l'ignorance. Mais nous bornerons là ces observations et nous emploierons la fin de ce chapitre à quelques indications utiles aux élèves, et à ceux qui vivent éloignés des capitales et des grandes bibliothèques.

1234. On a vu par les articles qui précèdent, ainsi que dans nos premières notions de physique générale, que l'air, ce fluide dans lequel nous vivons, et dont l'action contribue à plusieurs phénomènes naturels, mais dont il n'est pas toujours la principale cause, que cet air, disons-nous, est susceptible de changer de densité. On conçoit qu'il doit opposer alors une résistance différente au mouvement des corps, suivant leur forme, leur masse et leur étendue. Cet effet se fait sentir sur les oscillations du pendule. Nous n'avons pas encore d'instruments d'Horlogerie assez parfaits pour nous laisser distinguer les variations causées par ces diverses résistances qui sont en effet de peu de valeur ; cependant on a pu déjà remarquer que, malgré la *figure de moindre résistance* donnée généralement aux lentilles pesantes, les oscillations de son pendule diminuent d'étendue, lorsque l'on rétrécit l'espace d'une boîte déjà étroite où se trouve la lentille, et une autre assez curieuse expérience de physique a fait reconnaître que les vibrations du balancier d'un chronomètre tenu dans le vide, sous le récipient d'une machine *pneumatique*, sont accélérées de plusieurs minutes en 24 heures, quantité dont il suit que ces vibrations sont retardées sensiblement par la résistance de l'air sur les barettes, et probablement aussi par le frottement des surfaces en contact avec ce fluide. Si donc on parvenait à perfectionner davantage nos Pendules astronomiques, on aurait un moyen nouveau de mesurer les diverses densités de l'air, déjà connus par le baromètre. Et peut-être, en joignant au pendule une sorte de baromètre approprié, parviendrait-on à y compenser les effets des diverses densités du fluide ambiant.

1235. On sait aussi que les oscillations du pendule sont dues principalement à la gravitation centrale, et que l'intensité de celle-ci, et par suite la vitesse des oscillations, varient suivant les latitudes et l'obliquité de la direction de la force centrifuge qui réduit en partie l'effet de la pesanteur. Mais cette intensité de la gravitation à la surface terrestre est souvent altérée par d'autres causes, comme semblent le prouver les marées plus ou moins fortes attribuées pour environ un quart à l'attraction du soleil sur la

feuille 14° et le reste de ce 3° chap. par quelques suppléments aux 1res notions générales, comme suite de nos indications sommaires des connaissances accessoires que le véritable artiste doit toujours tâcher d'acquérir; nous publierons plus loin les autres communications qui nous sont promises.

surface des mers, et pour les trois autres quarts à celle de la lune, plus puissante par son extrême rapprochement de notre globe, comparé à la grande distance du soleil. Ces effets du corps le plus volumineux de notre système et de l'un des plus petits ne peuvent manquer d'affecter aussi la force de pesanteur des corps qui nous environnent, et par conséquent d'influer sur la durée de leurs oscillations, suivant la position de ces corps célestes plus ou moins approchante de la verticale, à l'égard des points d'observation. Les planètes mêmes peuvent avoir leur influence pour balancer la gravitation centrale sur notre globe, en raison de leur situation et de leurs différentes distances. Si ces influences n'étaient pas confondues et inaperçues parmi les variations propres de nos instruments, on conçoit qu'elles pourraient du moins être calculées pour former des tables diurnes de correction. Ce peu d'exemples, qu'il serait facile de multiplier davantage, prouvent déjà que la connaissance des principales lois des sciences physiques et mathématiques n'est point indifférente dans les recherches de haute Horlogerie, c'est-à-dire de celle marine et astronomique.

1236. Nous avons dit dans nos premières notions générales, d'après l'ancien langage des physiciens, que l'air est un fluide *incolore*, etc.; mais cette expression n'est sensiblement applicable qu'au peu d'épaisseur de la masse de l'air ; car la profondeur de plus grandes masses nous fait apercevoir dans les molécules de l'air la propriété commune à tous les corps de réfléchir à nos yeux, avec plus ou moins de mélange, un des sept rayons colorés qui composent la lumière blanche du jour. C'est ce qu'a constaté la savante décomposition de la lumière du soleil, découverte au moyen du *prisme* de cristal, par le célèbre *Newton*. C'est ainsi que l'épaisseur considérable de l'atmosphère nous réfléchit la couleur bleue de ce qu'on appelle communément le *ciel*, qui n'est pour le physicien que l'espace et l'épaisseur de quelques lieues de l'air qui enveloppe la surface terrestre. L'air se trouve mêlé dans les plaines de vapeurs plus grossières; mais sur les plus hautes montagnes, le bleu du ciel devient plus sombre et s'approche plus de paraître noir, parce qu'il perd de sa couleur propre en même temps qu'il est moins épais ; car le noir n'est pas à proprement parler une couleur, mais l'absence plus ou moins complète de la lumière réfléchie. La couleur bleue que la chaleur fait acquérir à une pièce de métal, et principalement d'acier blanchi ou poli, est attribuée par les physiciens au changement de configuration ou de propriété des molécules de la surface métallique; quelques-uns même ont cru y reconnaître un commencement d'oxydation. Il paraît en effet que le bleu des pièces d'acier est plus accessible à la rouille que les surfaces blanches bien polies, et que les surfaces bleuies deviennent plus âpres, moins lisses, et produisent plus de frottement.

1237. L'air au milieu duquel nous vivons, se mêlant presque toujours aux divers phénomènes qui sont sous nos yeux, le peuple ignorant croit les expliquer en disant souvent et fort mal à propos : *C'est l'air qui produit cela... Cela vient de l'air...* L'air produit en effet divers phénomènes, mais son action n'est souvent que secondaire, en s'y mêlant seulement, sans en être alors la cause principale et immédiate. Une grande partie des instruments et machines d'un *cabinet de physique* est destinée aux

expériences spéciales sur l'air atmosphérique et sur diverses sortes d'air, ou de gaz qui ont plus ou moins d'analogie avec le premier. Le principal instrument de ce genre est celui qu'on appelle *machine pneumatique*, du grec *pneuma*, souffle, air; elle se compose d'un ou de deux corps de pompe parfaitement calibrés, au moyen desquels des pistons extrêmement soignés servent à extraire *presque* complétement l'air contenu dans un récipient renversé sur une plate-forme de la machine, où ses bords sont clos autant que possible au moyen de cuirs gras. Un tube garni d'un robinet exactement rodé forme la communication entre le corps de pompe et l'intérieur du récipient, lorsque ce robinet est tourné d'un côté; tandis que, lorsqu'il est tourné à l'opposé, la communication n'a lieu, au contraire, qu'entre le corps de pompe et l'air du dehors : par ce moyen, l'air du récipient qui s'est étendu par sa propriété élastiquement expansive, depuis le récipient jusque dans le corps de pompe supposé ici être de même capacité, peut être chassé au dehors, en ne laissant que la moitié de sa substance sous le récipient. Un second coup de pompe enlève encore la moitié de l'air resté et retiré de nouveau du récipient, où ce fluide se trouve réduit alors au quart de sa masse, et en continuant ainsi indéfiniment, on réduit l'air restant à une rareté que nous avons dit devenir *presque* complète, vu qu'il reste toujours sous le récipient une petite quantité d'air extrêmement raréfié, égale à celle qui en a été retirée et expulsée par le dernier coup de piston; mais ce degré de rareté de l'air, pouvant être porté très-loin, peut suffire à presque toutes les expériences de ce genre. C'est ainsi que les corps placés sous le récipient de verre, de diverses formes et grandeurs de la *machine* pneumatique, peuvent être soumis à l'expérience de ce qu'on appelle le *vide*, qui peut être produit à un degré, sinon parfait, suffisant au moins pour le but qu'on se propose. On produit également et par un moyen analogue l'accumulation, la compression et la condensation de l'air, en le forçant d'entrer dans un récipient assez solide, et bien clos, tel que la crosse du *fusil à vent*, dont la capacité pourvue d'une soupape peut recevoir et retenir, par l'effet d'une pompe de pression et de la soupape, quatre à cinq cents fois plus d'air condensé qu'elle ne contiendrait d'air libre ordinaire. Cet effet résulte de la propriété de l'air de se condenser indéfiniment, du moins dans nos expériences, suite de son éminente élasticité, qui peut par la condensation acquérir la force expansive de la poudre à canon, et même faire crever, avec les résultats d'une bombe d'artillerie, le réservoir ou la crosse du fusil à vent, si les moyens de condensation étaient poussés à l'excès. Aussi les expériences de ce genre exigent-elles autant de prudence que de précautions physiques.

1238. Les propriétés de la lumière et les phénomènes de sa composition et décomposition cités plus haut sont exposés et expliqués dans les cours de physique, au moyen de divers appareils, où des prismes combinés font connaître les angles d'incidence et de réflexion des rayons lumineux, comme ceux de réfraction, qui produisent à l'œil le rapprochement apparent des objets éloignés, quand on les voit à l'aide des télescopes, soit catoptriques, soit dioptriques, ou des lunettes dites de longue vue, comme aussi les effets des lorgnettes, des microscopes, des verres et miroirs concaves ou

convexes, ou à facettes, etc.; tels sont en partie les phénomènes de l'optique; celle-ci peut apprendre aux Horlogers, en les étonnant presque toujours, que la simple lentille ou la loupe qu'ils emploient d'ordinaire, et qui n'est au fond qu'une espèce de prisme circulaire, ne grossit pas réellement la figure des objets, mais qu'elle permet seulement de voir distinctement ceux que l'on approche de l'œil beaucoup plus que ne le permet la vue distincte ordinaire. Les objets placés au même rapprochement de l'organe, sans lentille interposée, ne paraissent augmentés dans leurs dimensions qu'en raison de la plus grande ouverture de l'angle visuel dont les côtés embrassent le diamètre de l'objet; mais les bords et les divers points paraissent alors confus, et ce qu'on appelle *troubles* : or, la lentille de verre interposée ne change point cet angle, mais rend seulement distinct et *tranché*, ce que l'on n'apercevait d'abord que confusément à la même distance (les autres détails de ces phénomènes d'optique seraient trop longs à expliquer ici). On démontre de même en optique que les objets aperçus dans une lunette de longue vue ou un télescope ne sont point proprement ceux vers lesquels on dirige l'instrument, mais seulement leur image formée à peu de distance au foyer interne du verre oculaire, par la réunion, dans chacun de ses points, des gerbes de rayons lumineux réfléchis par chaque point correspondant de l'objet, et après diverses inflexions de ces mêmes rayons par le verre objectif, et les quatre lentilles du tube oculaire. Cette image formée au delà du 1er oculaire de la lunette, n'a d'autre matérialité que celle de la nature de la lumière; elle n'en est pas moins transmise au moyen du 1er oculaire et du cristallin de l'œil, sur la rétine qui tapisse le fond de celui-ci, où une seconde image est formée comme dans la chambre noire; alors l'effet en est transmis au cerveau par le moyen du nerf optique. L'avantage de l'achromatisme des objectifs est de même expliqué en optique par la propriété des diverses matières d'un objectif composé pour réunir en un seul et même point les foyers des rayons diversement colorés, dispersés sur leur axe par un seul verre objectif, ainsi qu'il arrivait aux premières lunettes, dont le verre objectif simple produisait la coloration ou les iris qui en accompagnaient l'image, et en altéraient la couleur propre; on a aussi obtenu par ce moyen des télescopes de 6 à 8 pieds, plus maniables, à lumière pure grossissant plus et mieux que les anciens instruments de cent pieds. Les microscopes composés font paraître les objets beaucoup plus gros et plus détaillés que les loupes ou lentilles simples; mais ils sont peu applicables aux travaux de l'Horlogerie, parce que leur verre objectif d'un très-court foyer nécessite trop son rapprochement de la pièce, pour en continuer le travail à l'aide de ce moyen. Cependant, en combinant, suivant les lois de l'optique, quelques verres de divers foyers, nous avons réussi à produire un de ces instruments composés dont le verre objectif pouvant rester éloigné d'un pouce de l'objet, donnait à l'image d'un pivot de 3,48es de ligne, l'apparence de 3 lignes de diamètre, sans renversement, et avec assez de *champ* pour en voir plus que la longueur. Le burin et le doigt y parvenaient facilement et sans toucher au microscope, ce qui permettait d'en apprécier beaucoup plus exactement le travail et sa correction. Les microscopes employés à l'étude de l'histoire naturelle ont

des pouvoirs amplifiants beaucoup plus considérables, mais l'extrême rapprochement de l'objet trop voisin de la lentille objective, quelquefois d'une demi-ligne de foyer et moins encore, ne permet pas de voir et d'opérer en même temps sur l'objet. Dans tous les cas, il faut augmenter la lumière portée sur les objets soumis aux microscopes, en raison de leur grossissement, suivant l'une des lois générales en optique qui veut que ce que l'on gagne en pouvoir amplifiant, on le perde ordinairement en nétteté et en intensité de lumière. Mais aussi, lorsque les corps sont très-lumineux de leur nature, ou peuvent être fortement éclairés, il est avantageux d'y augmenter le pouvoir amplifiant.

1239. Un cabinet de physique bien assorti contient un grand nombre d'appareils concernant la statique, c'est-à-dire les lois du mouvement et de l'inertie des corps solides, des forces mécaniques, les phénomènes de la collision des corps, etc.; d'autres concernent l'hydrostatique et les principes des pompes de toute espèce, aspirantes, foulantes, élévatoires, intermittentes, continues avec réservoir élastique d'air; les fontaines jaillissantes, la puissance du bélier et de la presse dits hydrauliques; enfin on y explique toutes les observations de ce genre sur les liquides.

On y trouve des appareils pour développer les manipulations et les phénomènes de la chimie, l'analyse des mixtes, la théorie des affinités, avec des collections principales relatives à la métallurgie et la minéralogie, comme parties de la Physique générale.

Les phénomènes acoustiques sont assimilés, presque généralement, dans leurs lois physiques, à ceux de l'optique et de la lumière; le rayonnement et l'intensité du calorique sont appréciés au moyen de réflecteurs, de pyromètres, de divers thermomètres, d'étuves, etc. Un grand nombre d'instruments concernent toutes les découvertes et les expériences sur l'électricité, le galvanisme et le fluide *aimantique*, etc., etc. Cette ébauche, encore bien incomplète, indique déjà combien il faut de machines simples ou compliquées pour former un cabinet de physique et réunir tous les instruments relatifs aux connaissances acquises par l'observation des phénomènes de la nature (1).

1240. Nota. Nous terminerons ce chapitre III par une observation relative à nos méthodes de gnomonique pratique traitée dans notre 1er vol. Quoique ces méthodes puis-

(1) Une des collections de ce genre les plus complètes en Europe est celle actuelle du *Conservatoire* des Arts à Paris; elle fut créée et formée par le célèbre physicien Charles, qui réunissait à l'amour de l'étude, et à la capacité d'en faire les plus judicieuses applications, un caractère simple et bon, communicatif et complaisant pour les moindres amateurs. Au milieu des tempêtes politiques, ce physicien philosophe, *sans ambition de richesses, de pouvoir, ni même de renommée*, ne s'occupait que des progrès de la science et fut estimé et aimé de tous ses contemporains, dont il emporta les regrets; parvenu à un âge avancé, il céda son vaste cabinet au Conservatoire, moyennant une pension nécessaire à son existence, avec le titre de professeur perpétuel du cours de physique de cet établissement. Ce fut avec des appareils en forme de *cerf-volant*, tenus par une corde enroulée d'un fil métallique, que Charles soutira des nuages orageux, avec toute la prudence et les précautions requises dans une épreuve si dangereuse, le fluide électrique nécessaire pour répéter dans son cabinet toutes les expériences pratiquées jusqu'alors avec le fluide électrique obtenu artificiellement de nos machines de physique. Ce fut ainsi que cet habile et hardi professeur constata péremptoirement l'identité de ce dernier fluide avec celui des nuées orageuses qui, en grande masse, produit des effets si violents et si destructeurs.

sent procurer une exactitude bien suffisante pour l'usage civil, si on les applique avec attention, on en comprendra encore mieux le but, si l'on a étudié, avant, la *Sphère armillaire* (1) et les ouvrages connus qui l'expliquent; il est utile, dans bien des cas, d'avoir acquis les premières notions d'astronomie physique, pour se faire quelques idées des phénomènes célestes. Nos articles ci-dessus de physique générale auraient pu nous amener sur ce sujet par une transition naturelle jusqu'à lui, après avoir parlé de l'optique, de même que plusieurs opticiens sont devenus astronomes; mais nous avons cru devoir reporter cet article un peu plus loin. Les *artistes* n'ont pas besoin d'être absolument astronomes; mais il peut leur être utile d'avoir plus ou moins de notions générales sur cette matière, ne fût-ce que pour le rétablissement de quelques pièces à mouvements et périodes astronomiques.

1241. Quant à la simple gnomonique, on a pu remarquer que nous avons souvent recommandé dans les cadrans solaires la direction exacte de leur *style* sur le pôle nord, ou vers l'étoile polaire qui en est peu éloignée. Or ceux de nos lecteurs qui ont connaissance de ce qu'on entend par les mots *parallélisme de l'axe de la terre*, pourraient y voir une apparente contradiction avec cette direction constante du style vers l'étoile polaire, direction pratiquée sur tous les cadrans de la surface du globe, malgré son déplacement ou sa translation sur divers points de son orbite annuelle autour du soleil, cette orbite n'ayant pas moins de 68 millions de lieues de diamètre moyen. C'est pour résoudre cette difficulté apparente que nous venons d'ajouter dans notre pl. (XXXIII), comme supplément aux articles de gnomonique, parmi lesquels celle que nous indiquons ici serait mieux placée, la figure actuelle qui représente le globe terrestre arrivé successivement sur quatre points opposés de son orbite annuelle. Le plan et la courbe de cette orbite ne sont vus ici qu'en perspective par l'observateur. La forme beaucoup trop ovale de la courbe (*acbd*) est le cercle annuel, vu en perspective pour le rayon visuel du lecteur qui le considère; car l'orbite annuelle de la terre, ainsi que celles des autres planètes, est bien une véritable ellipse, mais si peu différente d'un cercle, relativement à sa grande étendue, qu'elle serait peu sensible étant tracée en plan par des procédés graphiques, et ici l'ellipticité actuelle de la figure n'est que l'effet du raccourci d'un plan presque circulaire, vu obliquement. On conçoit maintenant que si une extrémité de l'axe *ae cf bg dh* de rotation diurne de la terre était prolongée indéfiniment dans l'espace, elle y tracerait à toute profondeur quelconque une courbe presque circulaire, absolument semblable à celle annuelle du globe, puisque l'axe en est conçu rester toujours parallèle à lui-même dans tous les points de son orbite, dont ceux des 4 saisons se trouvent indiqués dans la figure; or, comment accorder cette étendue d'un cercle ainsi décrit dans l'espace, avec le point unique du nord, auquel on dirige l'axe d'un cadran solaire? La solution de cette difficulté apparente ne sera pas difficile, si on remarque que le diamètre de l'orbite terrestre tracée à la distance de l'étoile polaire, par exemple, ne peut offrir à l'œil nu, ni même avec nos

(1) On trouvera ces instruments traités avec l'exactitude convenable et plus ou moins d'économie, chez M. Dann, ingénieur géographe, rue Hautefeuille, n° 15, qui indiquera en même temps les auteurs à suivre. On y trouve aussi les meilleurs globes terrestres et célestes, les plus belles cartes du ciel, etc.

instruments, une dimension appréciable, et qu'il ne peut pas même, à cette distance, avoir pour nous le diamètre d'une seconde de degré, que nos meilleurs instruments peuvent à peine accuser. Cette orbite annuelle du diamètre de 68 millions de lieues, tracée dans l'espace, n'est donc pour nous qu'un point, et il devient indifférent de prendre le milieu ou les bords de cette ellipse que nous avons dit être (1241) d'ailleurs très-peu différente du cercle.

1242. Parmi nos progrès dans la carrière des sciences et des arts, celui qui honore le plus l'esprit humain, est sans contredit l'astronomie, dont l'origine se perd dans la nuit des anciens temps, et qui s'est incomparablement plus perfectionnée dans nos derniers siècles. Il n'est guère permis aujourd'hui à ce qu'on appelle *gens du monde*, et encore moins à des *artistes*, d'ignorer quelle étendue de l'espace parcourt le globe que nous habitons; quels sont les corps voisins de celui-ci, roulant comme lui autour d'un même centre commun d'attraction, qui les retient dans leurs orbites, et leur communique son propre mouvement de rotation sur lui-même, etc. Il convient à un esprit qui veut s'affranchir *sensément* des déceptions vulgaires, de connaître au moins les principales dispositions physiques de notre *système planétaire*, soit au moyen de cours publics, soit par la lecture des ouvrages élémentaires sur ce sujet.

On sait déjà assez généralement que ces points brillants sur le ciel pendant la nuit, qu'on appelle *étoiles fixes*, sont autant de centres de feu ou de soleils analogues au nôtre, mais excessivement éloignés de notre globe, et dont nous ne recevons qu'un filet de lumière si délié qu'il n'est pas amplifié sensiblement par nos plus forts télescopes; ceux-ci dégagent seulement les étoiles d'une auréole amplifiante à la vue simple, et nous les font voir alors plus petites. Il n'en est pas de même d'un nombre très-petit, comparativement, d'autres corps célestes confondus vulgairement avec les étoiles, mais qui, faisant partie de notre système, sont beaucoup moins éloignés de nous; ceux-ci sont des *planètes*, des corps opaques, plus ou moins analogues à la nature de notre terre, du moins quant à leur propriété de réfléchir la lumière de notre soleil. L'image de ces planètes est alors amplifiée par les instruments d'optique, et l'on y peut distinguer des nuances diverses. La lune, par exemple, n'étant distante de la terre que d'environ 80 mille lieues, ce rapprochement (comparatif) nous laisse déjà apercevoir, à la surface de ce satellite, des chaînes de fortes montagnes, d'immenses cratères de volcans, mais c'est à peu près tout ce que les bornes actuelles de nos instruments nous permettent d'y découvrir (1)..... Nous suspendrons ici la suite de ces idées générales pour la reprendre ailleurs, à l'occasion du *réglage par les étoiles*.

(1) Il n'y a pas encore longtemps que, dans un pamphlet romanesque un peu malin, et qui séduisit d'abord trop de lecteurs, on supposait qu'au cap de Bonne-Espérance (l'espérance comme le mensonge viennent volontiers de loin) on avait distingué des habitants dans la lune, au moyen d'un immense télescope. Cette mystification ne cessa que quand les astronomes et les opticiens savants eurent déclaré, entre autres objections fondées, que dans l'état actuel de nos moyens d'optique un pareil instrument est impossible, et que de si énormes dimensions seraient impraticables, et d'un travail trop défectueux, pour permettre de distinguer à une telle distance, des animaux de la plus grande taille connue.

CHAPITRE IV.

TRAITÉ DE L'ENGRENAGE.

OBSERVATIONS PRÉLIMINAIRES.

1243. On a dû remarquer dans le chapitre premier et introduction à notre première partie, p. 99 et suiv. (à la suite d'articles concernant les savantes recherches de *Huyghens*), quelques principes généraux anticipés, et deux méthodes de tracer la courbe théorique des dentures; plus loin, page 105 et suiv., plusieurs réflexions sur les conditions essentielles d'un engrenage exact. Ces articles annonçaient déjà assez la nature de ce problème pour mettre des esprits capables sur la route de sa solution; mais ce n'était pas le lieu de développer davantage ces notions abrégées. Cependant il conviendra aujourd'hui d'en revoir les articles, comme préparation à la méthode qui va suivre; nous nous dispenserons donc de les répéter ici, afin de faire place à d'autres remarques ; on n'en saurait opposer trop à des habitudes vicieuses et enracinées.

1244. Les méthodes vulgaires, abréviatives mais inexactes, de prendre les proportions des pignons sur la mesure des dents des roues, ont toujours nécessité des corrections hasardées, aussi dénuées de principes que les règles fausses qu'elles tendaient à rectifier, et ont souvent donné lieu de penser que, faute de mesures fixes sur ce sujet, il y avait de l'arbitraire dans celles de l'engrenage : c'est néanmoins une erreur qui sera complétement réfutée par les citations historiques et les remarques suivantes, autant que par la démonstration toute théorique par laquelle nous terminerons nos observations sur cette question. *V. p. 243 ci-après les art. cités.*

1245. *Roëmer*, savant danois, qui vivait au milieu du dix-septième siècle, et *Lahire*, en France, vers le même temps, paraissent avoir ébauché la question de l'engrenage, en y portant la lumière de l'analyse théoque. *Lalande* est le dernier savant qui, après d'autres, en ait reproduit la démonstration, dont, avec divers articles, il a enrichi le traité de *Lepaute* en 1767 (1). Dans l'intervalle, *Camus*, de l'Académie des sciences, en avait fait l'objet d'un mémoire inséré dans Thiout vers 1741. Ce même travail de *Camus* se retrouve, mais plus développé, dans son Cours de mathématiques, 3e édit. de 1767, tome 4e, et c'est ce que nous connaissons de plus complet sur cette matière. M. Le Roi, de l'Académie, l'un des quatre fils distingués de notre célèbre Julien, en a dit aussi quelques mots, suivis d'une démonstration théorique, dans l'Encyclopédie methodique de

(1) Voy. dans e Traité de Lepaute en 1 vol. in 4°, Paris 1767, p. 230, le chap. des *Engrenages*, suivi de celui du *Calcul des rouages* et de la *Théorie du pendule*, tous trois de M. *Le François de Lalande*, de l'Acad. des sciences; ils occupent environ 80 pages de cet ouvrage estimé, mais trop circonscrit, de 300 pages en gros caractères et très-petite justification; chaque page n'y contient que le tiers de celles de notre nouveau traité. On doit y remarquer, du reste, outre les articles importants de M. de Lalande, l'échappement *à chevilles* amélioré par Lepaute, que nous donnerons bientôt, avec quelques autres articles dignes d'être recueillis, et auxquels seront jointes des observations d'auteurs encore plus modernes, et qui sont généralement adoptées.

Panckoucke, refaite d'après celle de *Diderot* et *d'Alembert*. Tous ces auteurs sont, du reste, d'accord sur les principes propres à résoudre ce problème.

1246. « Une machine, dit *Camus*, qui ne va pas uniformément, et dont les parties font « les unes sur les autres des efforts variables quand on lui applique une force constam- « ment égale, a besoin pour aller, et pour vaincre une résistance donnée, qu'on lui ap- « plique une puissance dont la force absolue puisse diminuer ou augmenter, suivant les « situations plus ou moins favorables de ses pièces ; et si l'on veut que la puissance ap- « pliquée à une machine soit constante, cette puissance doit être capable de la mouvoir « dans la situation la plus désavantageuse de ses parties; ainsi la force qui suffirait pour « mouvoir une machine dans une situation moyenne de ses parties ne serait pas suffi- « sante pour la faire marcher dans toutes les situations possibles. Une autre machine, au « contraire, dont les parties seront continuellement, les unes à l'égard des autres, dans des « situations également avantageuses, marchera toujours en lui appliquant une force mo- « trice moyenne qui ne pourrait point faire marcher la première dans toutes les situa- « tions que ses pièces peuvent avoir.

« On doit donc regarder comme la meilleure figure que l'on puisse donner aux dents « des roues d'une machine celle qui fera que ses dents seront toujours, les unes à l'é- « gard des autres, dans des situations également favorables, et qui donnera par conséquent « à la machine la propriété d'être mue uniformément par une puissance constamment « égale.

« Si toutes les roues pouvaient avoir des dents infiniment petites, leur engrenage, qu'on « pourrait regarder comme un simple attouchement, aurait la propriété qu'on demande, « puisqu'on a vu (1) que la roue et le cylindre, qu'on nommera dans la suite *pignon*, « ont tous deux la même force *tangentielle*, c'est-à-dire la même force pour tourner, lors- « que le mouvement se communique de l'un à l'autre par le seul attouchement, ou par « un engrenage infiniment petit des parties de leurs circonférences. Les dents finies « et sensibles que l'on fera aux roues et aux pignons seront donc telles qu'on peut le « demander, lorsque la roue conduira le pignon, ou que le pignon conduira la roue, « comme si le pignon et la roue se touchaient simplement (*sans denture, comme des dis- « ques unis et appuyés entre eux par la simple pression*). »

1247. Ferdinand Berthoud dans son *Essai*, tome II, page 11, expose en d'autres ter- mes ce que Camus venait de dire de son temps, et nous le citerons également, comme plus explicite pour notre sujet principal, et pouvant éclaircir davantage ce qui précède. « La perfection des engrenages, dit *Berthoud*, est une partie si essentielle dans les ma- « chines, et surtout dans celles qui mesurent le temps, comme les Montres et les Pendules, « qu'on n'y peut porter trop de soin et d'attention... Si un rouage est composé de roues « et de pignons dont les engrenages sont mauvais, dans certains moments chaque roue « agira sur son pignon avec le plus grand avantage; ainsi la force transmise au régula- « teur sera la plus grande possible, et dans d'autres moments chaque roue agissant sur

(1) *Camus* rappelle ici un article précédent de ses *Éléments de mécanique statique*, 4e volume de son Cours de mathématiques, chap. 2, art. 433, *Sur les roues dentées en général*.

« le pignon avec le moins d'avantage, la force du moteur en sera comme anéantie. Le « régulateur ne recevra que des impulsions extrêmement faibles. Mais si la force mo- « trice est suffisante pour le cas le moins favorable des engrenages, elle devient néces- « sairement trop grande dans le cas le plus favorable, d'où résultent des frottements de « l'usure et des inégalités qui tendent à détruire la machine et à la faire varier. » Le même auteur revient encore sur ce sujet, et en même sens, dans plusieurs articles des 9 volumes in-4° de ses nombreux travaux. A la suite de l'article précédent, *Berthoud* donne dans l'*Essai*, et sans moyens d'application, une démonstration théorique qui se trouvait antérieurement dans *Thiout*, et qui ne peut instruire des principes que ceux qui sont assez géomètres pour la suivre. Du reste, Berthoud, dans ses détails de main-d'œuvre, se borne toujours à l'emploi des mesures vulgaires et inexactes des ateliers; nous les avons reproduites dans notre art. 564 et suiv., d'après lui, mais seulement pour l'usage commun, et en faisant remarquer leurs défauts, les variations de quelques auteurs, et les passages de Berthoud où il convient lui-même de leur insuffisance. Nous en avons dès lors annoncé la rectification par la méthode que nous exposons actuellement. Dans ces fausses mesures, il n'y a guère que le pignon de 12 dont la proportion approche d'être conforme à celle de la vraie théorie; les autres en diffèrent d'un quart, d'un tiers, d'une moitié et parfois de toute l'épaisseur d'une de nos ailes, et nous avons suffisamment averti de leur inexactitude générale. On trouve proposé ailleurs, en définitive, d'armer les deux axes du pignon et de la roue d'aiguilles indiquant sur des cercles divisés les irrégularités de la menée, pour corriger par tâtonnement la courbe des dents, ce qui n'est pas assurément un moyen expéditif. Enfin, par suite de contradictions trop ordinaires, il paraît que la célérité d'un moyen reconnu défectueux, mais qu'on pensait pouvoir corriger suffisamment par l'expérience, a prévalu d'abord sur le besoin d'appliquer au sujet les principes de la théorie déjà connus : on adopta presque partout cette fausse méthode, et l'on s'est borné depuis à prévenir par plus ou moins de pénétration sur le *compas d'engrenage*, les accotements qui auraient arrêté le rouage, sans s'occuper de l'uniformité de la menée ni de celle de la force transmise.

1248. L'article de l'Encyclopédie méthodique attribué à Le Roi, de l'Académie, se borne à ce peu de mots, mais décisifs : « C'est une chose d'une grande importance dans les « machines, que la perfection des engrenages; s'ils ne sont pas faits avec précision, il « en résulte de grands frottements, beaucoup d'usure, et quelquefois même des arrêts. » Il en donne un peu plus loin une démonstration théorique, toujours conforme au principe général des autres auteurs.

1249. Enfin le chapitre de *Lalande* inséré dans *Lepaute* porte vers la fin ce qui suit : « Les principes (des engrenages) que les Horlogers ont suivis jusqu'à présent sont fort éloi- « gnés de ceux que nous venons d'établir; il y a toujours eu beaucoup de variété et d'in- « certitude dans leurs méthodes, ou plutôt ils n'en ont jamais eu; en Allemagne, on fait « des pignons *à lanterne;* en France, des pignons *en grain d'orge;* en Angleterre, des « pignons *à ailes plates* (probablement *en planche*); il semble que la mode ait tout fait, « et que l'expérience n'ait rien appris. Il serait donc utile à tous les Horlogers de tracer

« suivant la méthode que nous avons donnée des modèles ou des calibres pour les diffé-
« rentes dimensions et les divers nombres des roues et des pignons qu'ils emploient; ils « auraient bientôt la main faite à cette forme avantageuse de denture, et l'on ne perdrait « rien dans la facilité de l'exécution... C'est ordinairement leur difficulté que l'on allègue « contre les choses nouvelles, quelque utiles qu'elles puissent être; il y a néanmoins là « beaucoup d'arbitraire, la chose ne dépend que de l'habitude contractée, dans quelque « partie, par un nombre d'artistes plus ou moins grand. Tout ce qui est actuellement « aisé a paru impraticable dans sa première origine, et *tout ce qui paraît aujourd'hui rare et difficile deviendra avec le temps facile et ordinaire.* » C'est précisément l'excellent conseil de Lalande que nous suivons ici, en donnant, dans nos figures, ces modèles tout tracés en grand, et qu'il ne s'agit plus que de réduire aux dimensions voulues. Nous en fournissons amplement les moyens, et si on ne les adopte pas, ce ne sera pas faute d'explications.

1250. Il est bien avéré aujourd'hui que, dans les ouvrages anciens, les dentures de forme arbitraire et vicieuse absorbaient très-inégalement une grande partie de la force motrice; que la routine et le tâtonnement y étaient les seuls guides (1); et que Roëmer et Lahire furent les premiers qui s'aperçurent de l'usage que l'on pouvait faire de la science pour régulariser les engrenages; que Camus en fit le sujet d'un Mémoire à l'Académie des sciences, dont Le Roi, de la même Académie, démontra quelques cas, par la considération des leviers déjà employés par La Hire. Ces savants ont été complétement d'accord sur la théorie, mais aucun d'eux n'a indiqué de méthode d'application; ils devaient en effet en laisser le soin à des artistes également instruits dans la théorie et dans la pratique, seuls juges des moyens d'exécution, car il faut *savoir mettre la main à l'œuvre* et posséder une longue expérience du genre, pour en connaître les difficultés et les ressources. Mais ce qui doit étonner, c'est que, parmi tant d'artistes distingués et qui ont écrit sur leur art, aucun n'ait essayé d'établir une méthode pour subordonner régulièrement l'application à la théorie, ni même, à ce qu'il paraît, de s'en faire une pour lui-même. Ils préconisent avec raison cette théorie, ils en donnent des idées plus ou moins développées, mais pour l'exécution ils en reviennent toujours à la méthode vulgaire des ateliers, plus facile et rapide dans son usage, et en même temps si défectueuse; ils reconnaissent les défauts de celle-ci, et recommandent de les corriger par l'expérience et le tâtonnement, comme ils l'ont pratiqué eux-mêmes, ce qui n'est pourtant ni facile, ni expéditif, ainsi que l'a fait Ferdinand Berthoud dont nous n'avons donné les mesures de pignons prises ainsi sur les dents des roues que comme inexactes (v. l'art. 565, où est déjà annoncée la présente méthode seule régulière). De l'aveu même de ces anciens auteurs, on ne doit rien admettre de vague et d'incertain dans un art de précision aussi

(1) Ce furent ces mauvaises dentures qui suggérèrent la première idée du remontoir à *Huyghens* et à Leibnitz; celui-ci était trop métaphysicien pour s'occuper longtemps de mécanique. Mais le *génie* plus solide de Huyghens donna, comme on le sait, la plus forte impulsion au progrès de l'art; ce fut lui qui imagina une grande partie des perfectionnements que l'on y pratiqua plus tard. Voy. *Eugenii horologium oscillatorium, Parisiis,* 1673.

exigeant que celui qu'ils professent; mais la longueur de leurs travaux si minutieux et multipliés, absorbant le temps nécessaire aux recherches, a maintenu jusqu'ici cette négligence, comme tant d'autres dont il faut ensuite corriger les mauvais résultats; tant il est vrai que l'on aime mieux convenir de ses torts que s'en corriger!

1251. Ces méthodes courantes mais incomplètes sont diverses, et aucune n'offre l'exactitude à laquelle les progrès actuels de la main-d'œuvre et le perfectionnement des outils et machines permettraient d'atteindre, aucune n'explique et ne fait concevoir les rapports nécessaires entre les proportions des mobiles; celle citée plus haut, par certains nombres et fractions de dents des roues, de mesure variable, n'est qu'une rencontre accidentelle qui s'écarte beaucoup du vrai; elle varie de la Montre à la Pendule; elle ne donne pas la mesure d'une roue perdue dont on n'a que le pignon qui y engrenait, ni la différence *positive* de grosseur du pignon qui mène. Le *compas de proportion* ne fournit que des diamètres nus, primitifs, sans y comprendre par conséquent l'*excédant* ou ce qu'on appelle communément l'*arrondi* des dents et des ailes; on n'y a donc point la mesure totale des mobiles; diverses autres mesures rapportées dans Thiout ne peuvent être prises qu'avec le compas ordinaire, à pointes sèches, sur des rayons tracés, etc., mesures toujours indécises de leur nature et transportées plusieurs fois : on conçoit assez toute l'inexactitude de tels procédés. Ferdinand Berthoud recommande encore, pour la Pendule, une bande de carte où l'on imprime la trace d'un nombre de dents qui dépasse plus ou moins celui du pignon, suivant le nombre de ses ailes; alors on diminue le cylindre d'acier dont ce pignon doit être formé, jusqu'à faire toucher les deux bouts de la bande de carte enroulée sur ce cylindre. On voit que tous ces moyens n'indiquent aucun principe, et n'offrent nullement l'exactitude propre à l'Horlogerie et si nécessaire à des travaux qui exigent tant de précision.

1252. Le compas de *Prudhomme* est plus général dans ses mesures, approximatives toutefois; mais on peut juger de la rectitude de ses idées, quand on voit que ce compas n'établit point de différence entre le diamètre *total* d'une roue plate et celui d'une roue de champ de même nombre, quoique celle-ci n'ait point d'excédant en dehors de son *diam. prim.* On trouve encore dans son instruction fort obscure, à peine devinée par ceux qui posséderaient la matière, que l'auteur tire l'origine de ses proportions de l'engrenage de deux pignons de 6 qui n'ont jamais pu produire une menée uniforme, et que, pour généraliser sa méthode, il s'écarte fort librement des principes théoriques, qui ne paraissent pas même lui avoir été bien connus. Cependant cet instrument, quoique peu propre à la précision requise en ce genre, et dont certainement les bases de construction ne seraient pas admises par des mécaniciens instruits, peut suffire aux ouvrages courants des fabriques, comme propre à garantir des arrêts majeurs dans le rouage, mais nullement du défaut d'uniformité de force et de menée. Du reste, il est assez incommode à manier, d'un haut prix, souvent contrefait, et alors encore plus infidèle.

Le chapitre cité du Cours de mathématiques de Camus contient certainement l'instruction la plus complète pour ceux qui possèdent les éléments de géométrie et d'algèbre; mais, avec cette théorie, ces démonstrations, il faut, pour la simple pratique, une méthode

d'application à l'usage des ateliers, et qui n'a jamais été cherchée, ni donnée généralement; il leur faut des mesures usuelles, sans recherches théoriques.

1253. On pourrait encore ajouter à ces observations cette dernière-ci, qui ne sera pas la moins singulière : c'est que beaucoup de mécaniciens capables entendent et observent parfaitement les principes théoriques de l'engrenage, bien que l'emploi en soit moins fréquent pour eux et que les masses et les forces disponibles leur laissent beaucoup plus de latitude, tandis que les Horlogers, qui ne peuvent presque rien exécuter sans rouages, dans leur partie spéciale, et qui ont tant à ménager les forces, à conserver l'intégrité des parties frottantes, etc., ignorent ou négligent généralement les principes de l'engrenage ! Nous espérons qu'après avoir pris connaissance de ce que nous en exposons, l'indifférence habituelle pour des méthodes vicieuses pourra cesser chez les amateurs de la précision, pour qui nous en développons ici les véritables règles.

1254. Il est peu d'Horlogers qui n'aient un peu d'usage des chiffres et d'un certain degré de calcul arithmétique, car comment sans lui trouver les nombres du rouage et des vibrations voulues du balancier pour les *mouvements* d'Horlogerie les plus ordinaires? Quant à d'autres plus instruits, ils saisiront sans peine l'esprit et les calculs simples de notre méthode, et l'adapteront, s'ils le veulent, avec facilité, à moins qu'ils n'en possèdent une plus exacte et plus expéditive. Celle-ci n'est qu'une traduction de la théorie dans la langue des nombres, bien plus répandue. L'usage des quatre premières règles de l'arithmétique et des fractions y suffit. Le moyen est simple, exact comme son origine, et directement applicable à tous les cas. Si l'on se borne, comme il arrivera le plus souvent, à copier et réduire nos figures d'après les distances des centres que l'on aura fixés pour l'exécution, l'opération sera certainement beaucoup plus courte que l'explication, qui exige des détails d'instruction pour un premier essai. On y aura promptement la grandeur des deux mobiles, et la pénétration de l'engrenage, sans même employer le *compas d'engrenage*. Ce ne sera que pour tracer en grand et avec d'autres nombres aux mobiles, ou pour établir de suite sans dessins les très-petites dimensions d'un calibre donné pour l'exécution, que les fractions exigeront un peu plus d'usage de les manier. Comme l'exactitude absolue réunit rarement la facilité et la célérité, cette méthode devient plus longue en proportion de sa précision. Mais aussi son calcul, au fond très-borné, s'abrége beaucoup par l'habitude de l'appliquer. Et, d'ailleurs, un chemin plus long n'est-il pas toujours préférable à l'impossibilité d'arriver au but, qui est ici l'application pratique et exacte de la vraie théorie? On ne propose pas cette méthode à ceux qui recherchent la célérité des *à peu près*, et qui pratiquent l'Horlogerie, non comme un art libéral, mais comme objet de commerce et de spéculation; on renonce seulement à des moyens aveugles et faux. Nous ne proposons la méthode arithmétique qu'aux esprits portés à l'analyse et qui veulent se rendre compte de leurs opérations : sous ce rapport, elle ne conviendra sans doute qu'à peu de personnes; mais du moins celles qui seraient disposées à en profiter la trouveront ici, telle que nous l'avons souvent appliquée avec succès.

1255. Si un artiste instruit dans cette matière avait une méthode plus facile, et voulait nous la communiquer, nous nous empresserions de la répandre en son nom (1).

DE L'IMITATION DES FIGURES DE NOS PLANCHES RELATIVES A L'ENGRENAGE.

1256. Cette méthode de simple imitation sera plus rapidement pratiquée qu'elle ne peut être décrite, vu la réunion d'observations qui peuvent être utiles à ceux qui l'emploieront pour la première fois. Il ne s'agit que de réduire en plus petit et de tracer sur un calibre ou platine de laiton, suivant la dimension voulue, les mesures principales de nos figures en grand. Quant au nombre des dents de la roue, il peut être plus grand, même presque double, ou plus petit, mais non pas au-dessous de 30 dents, *pourvu que* « le rayon primitif de la roue et la distance des centres soient établis en même rapport « avec le pignon que celui du nombre des dents de la roue avec le nombre des ailes de « ce même pignon. » La différence légère qui résulte, pour l'excédant, du changement du nombre de la roue, est trop faible pour empêcher de copier dans la pratique la forme des dents de nos figures, au moyen de la substitution nécessaire de diverses limes à arrondir, et qui ne devront modifier que les points voulus de la courbe (2). Nous avons déjà indiqué à cet égard un moyen optique de confronter la forme d'une très-petite dent avec celle de nos figures amplifiées (3). Du reste, on sait par expérience que l'habitude des précisions de l'Horlogerie facilite suffisamment l'imitation des formes, à la seule vue aidée du microscope, témoin l'ancien arrondissage à la main, porté jadis à une si rare perfection, proportionnellement à l'époque.

1257. Pour mesurer les dimensions principales des figures, on se procurera une de ces règles divisées, que l'on trouve toutes faites, qui portent sur l'un de leurs bords les centimètres et millimètres, et sur l'autre bord les lignes et pouces du pied de roi. Il faut aussi, pour tracer des calibres, avoir un compas avec son manche, dit *compas à calibre*, avec pointe à champignon et à pompe, vis de rappel pour l'autre pointe, etc., que l'on trouve

(1) C'est ainsi que pensait un ancien et sage auteur : « *Si quid scis melius candidus, imperti, si* « *non his utere mecum.* Si vous savez mieux, faites-en part franchement; sinon, usez avec nous « de nos moyens. »

(2) Il est vrai, en principe rigoureux, que si le changement de nombre des roues, en y tenant toujours leur diamètre proportionnel, n'influe pas sur leur distance entre elles, prise à la circonférence primitive, elle modifie au moins quelque peu celle de la pointe ogive des dents; mais cet effet de quelques 50es de millimètre est beaucoup moindre qu'on ne l'a supposé dans les mesures vulgaires, lorsque l'on a voulu établir une différence de la Montre à la Pendule; ainsi cette observation n'y est pas plus exacte que les mesures elles-mêmes. D'ailleurs cette différence des plus minimes s'évanouit ici, comme celle du retrait du papier, dans la réduction considérable de nos figures. C'est ce qu'on verra plus loin à l'article du pignon de 8, où nous avons indiqué au pointillé une roue de 32 dents, superposée à celle de 64 avec le même pignon. La différence est de celles qui se perdent dans la réduction; et l'on obtiendrait difficilement plus de régularité sensible, en traçant exprès l'engrenage pour le nombre précis des dents de la roue.

(3) Voir l'article du tome Ier, p. 103, que bien des lecteurs auront passé sans y faire attention, suivant l'usage; ce sera ici, du moins, une occasion d'y recourir.

chez tous les fournisseurs d'Horlogerie. Mais ce que l'on n'y trouve pas, et qu'il est aisé de faire soi-même, c'est un petit compas à pignon, formé à peu près comme un *tire-ligne* d'étui de mathématiques; une de ses branches, plus forte, est terminée en pointe aiguë et régulièrement conique ; l'autre, plus faible et méplate, se tient éloignée de la première de 5 à 6 lignes par son état naturel de ressort, et se termine par un tranchant de ciseau étroit, dont la face regarde l'autre branche, le seul biseau du tranchant étant en dehors. Une vis de rappel à pas très-fins, semblable à celle du tire-ligne, mais plus soignée, rapproche à volonté les deux branches. Celles-ci sont soudées à une longue virole garnie de son manche très-petit, et plus court que celui d'une petite lime à arrondir. Enfin, un 3e outil, *le plus essentiel,* est un petit compas à verge, à *vernier* avec vis de rappel, et à pointes droites, dont les deux pointes réunies à zero de l'échelle forment un cône qui doit se trouver fendu parfaitement au milieu de sa pointe (1).

1258. Nous devons prévenir d'abord de la valeur de quelques expressions indispensables quand il s'agit d'engrenage. Nous les avons déjà expliquées dans nos *définitions* en tête du 1er vol., art. DENT : le *rayon primitif,* le *diamètre primitif* et la *circonférence primitive* ou *cercle primitif* aboutissent ou passent au pied des *excédants* ou arrondis au point où ceux-ci se réunissent aux flancs des dents et des ailes. Le rayon *total,* le diamètre *total,* et la circonférence *totale* passent ou aboutissent au sommet de l'arrondi en demi-cercle du pignon, ou sur la pointe de l'*excédant* ogive des dents de la roue, et donnent les grosseurs ou grandeurs *totales* des deux mobiles. Celles-ci n'ont aucun rapport théorique entre elles; les rapports de grandeur ou grosseur, ou la distance des centres, ne se comparent qu'entre les dimensions *primitives,* ce qui rend la connaissance et l'usage de ces distinctions tout à fait essentiels dans cette matière.

1259. Si nous avions à réduire la fig. de l'engrenage du pignon de 6, pour l'usage de la Montre, la réduction pourrait être du 30e au 50e, etc., et alors il pourrait y avoir avantage à préférer la division de la règle en millimètres, et les fractions à prendre sur le vernier *décimal* deviendraient de même espèce. Le rayon primitif de la roue, dans la figure, est de 19 centimètres, ou 190 millimètres, à 1 demi-millimètre près, qu'il convient mieux de laisser en plus à la roue qui doit pour sûreté tenir plutôt du grand. Mais ici, pour une réduction au 12e, par exemple, propre à la Pendule, on peut se contenter de l'ancienne mesure du pied de roi, plus usitée chez les anciens artistes et dans la province : alors les fractions vulgaires à prendre sur leur vernier duodécimal sont des 12es

(1) Ce compas à verge et à micromètre avec vis de rappel aura les deux divisions, en lignes et en millimètres, ayant chacune deux *verniers* en 10es et en 12es; on s'en occupe d'après un modèle donné. L'adresse en sera indiquée à la fin de nos articles sur l'Engrenage. Cet instrument est d'un usage très-précis dans l'Horlogerie, et plus exact que ceux à pivot et engrenage. Nous avons dit (note de l'art. 317) combien les compas à aiguille sont fautifs, en ce que leur aiguille indique les *degrés* du cercle, tandis que leurs mâchoires ne mesurent que des *cordes* du cercle, ce qui est bien différent, par exemple, quand on s'en sert pour établir une mesure double d'une autre; car il y a nécessairement erreur par les degrés égaux du cercle, ou grande difficulté de précision dans des divisions qui devraient être progressives, pour que le rapport fût exact, comme l'emploi de l'instrument l'exigerait. Mais c'est précisément ce que les faiseurs de ces outils par état ne pratiquent pas.

de ligne ou des *points*, expression encore usitée. Du reste, les mesures duodécimales ou par 12 offrent plus de diviseurs sans reste que celles décimales, où il est suppléé, il est vrai, par des zéros que l'on peut ajouter aux fractions décimales à un degré qui en fait évanouir sensiblement les différences. Mais la division sexagésimale du cercle en 360°, multiple de 60, est préférée, en Horlogerie, à celle décimale en 400°, parce que la première, plus ancienne, présente un plus grand nombre de diviseurs sans reste. Ceux qui sont exercés dans le calcul se serviront à volonté de l'une ou de l'autre mesure. Nous allons maintenant détailler l'opération dont il s'agit, et même plus que ne l'exige un sujet aussi simple.

1260. Le premier soin à prendre sera de tracer sur le calibre une ligne droite verticale appelée la *ligne des centres*, d'environ 18 lignes de longueur, pour qu'elle puisse s'étendre un peu au delà de la roue et du pignon tracés entiers. On mesurera, avec la règle divisée en pouces et lignes à l'un de ses bords, le rayon primitif F *a* ou F *b* du pignon de 6, fig. 1. pl. XXXIII, que l'on trouvera être d'un pouce juste. On réduira sur le compas à verge et vernier cette mesure à son 12°, qui est d'une ligne juste, et l'on portera cette distance, F*a* F*b*, réduite, par le compas à verge, en employant ses deux pointes pour la marquer sur le trait droit du calibre, au-dessus et au-dessous de F, le tout à environ une ligne plus bas que le bout supérieur du trait, et l'on aura déjà le diamètre primitif réduit du pignon. Ensuite on mesurera avec la règle le rayon primitif de la roue, depuis *b* jusqu'en E plus E G, mis bout à bout en ligne droite ; on trouvera 7 pouces juste. En conséquence, on prendra 7 lignes juste du compas à verge, que l'on portera du point *b* en G centre de la roue, puis une seconde fois au-dessous de G pour l'autre rayon primitif opposé de la roue, et l'on aura ainsi sur la ligne des centres le diamètre primitif de la roue, immédiatement au-dessous de celui primitif du pignon, l'un au bout de l'autre. On percera de suite sur chacun des points F et G un très-petit trou de pivot, traversant de part en part la platine du calibre, afin que ces deux points fixant la distance des centres soient assurés contre toute déviation.

On prendra ensuite avec la règle la mesure du rayon *total* F*c* du pignon de la figure, que l'on trouvera de 1 pouce 2 lignes+1/8, et la mesure correspondante réduite sur le compas à verge, et qui sera de 2 lignes 2 points ou 12es du vernier, sera portée sur le calibre depuis F jusqu'au delà de *a* en haut, et de *b* en bas; ce qui donnera le diamètre total du pignon. On négligera la réduction du 8°, qui deviendrait un 96°, pour laisser le pignon tenir plutôt du petit, suivant la précaution pratique ordinaire et sensément motivée. Puis on prendra, sur la figure et avec la règle, la mesure du rayon total de la roue de G en *g'*, que l'on trouvera de 7 pouces 6 lignes, et on la réduira par le compas à verge à 7 lignes 1/2 ou 7 lignes 6/12es, et l'on marquera cette ouverture sur la ligne des centres de G en *g'*, et en contre-bas, à l'opposé, sur la même ligne; ensuite, avec le petit compas à pignon, on tracera du centre F la circonférence primitive *aabb* du pignon, puis sa circonférence totale *c*C*d*. Enfin, avec le compas dit à calibre, dont la pointe à champignon sera placée au centre G de la roue, on tracera la circonférence primitive de la roue

BB qui doit tomber juste sur celle primitive du pignon, sans chevaucher ni la dépasser, et de suite on tracera aussi la circonférence totale de la roue D D.

1261. On aura ainsi, par cette petite opération bien moins longue à exécuter qu'à décrire, ainsi que nous l'avons annoncé, la grandeur et grosseur totale des deux mobiles, la distance de leurs centres d'accord avec leur nombre, et leurs circonférences primitives au delà desquelles sont leurs excédants. Les circonférences totales, comprenant ces excédants et croisant l'une sur l'autre, feront connaître la quantité de pénétration de l'engrenage. La denture de la roue, tant pleine que vide, lorsqu'elle sera toute finie, se trouvera d'elle-même en proportion avec le tout. Si le nombre des dents de la roue est changé, le même changement relatif aura lieu dans le diamètre de cette roue; et les distances des dents seront les mêmes, si le rapport entre les rayons ou entre les diamètres du pignon et ceux de la roue est semblable au rapport entre le nombre des dents et celui des ailes : ce qui est une règle fondamentale. Quant aux ogives des excédants des dents, elles seront imitées d'après la figure, en conservant leur pointe, et même en laissant une très-petite surface plate à l'extrémité. Les arrondis du pignon seront en demi-cercle, sans descendre plus bas que sa circonférence primitive, et s'élèveront juste à la hauteur de sa circonférence totale. Ces dents et ces ailes ne se tracent point sur le calibre, à raison de leurs trop petites dimensions, et seraient d'ailleurs inutiles.

1262. En traçant sur les faces des dents et des ailes leurs circonférences primitives, et en faisant coïncider celles-ci exactement, on y trouvera le moyen de vérifier la pénétration d'engrenage plus sûrement qu'avec le compas de ce nom, car elle n'est pas toujours à son vrai point lorsque le roulement rapide de l'engrenage paraît le plus doux sur le compas. Les points *h i* K sont les centres des parties de cercle qui forment les ogives dans la figure, que l'on imitera en petit dans l'arrondissage avec l'*outil*.

Si l'on sépare de cette méthode simple d'imitation les avertissements et observations de détail qui ne sont ajoutés que pour prévenir les erreurs d'un premier essai, on voit qu'elle se borne à des opérations fort simples de réduction, dont il est bon néanmoins d'écrire à chaque mesure le calcul diviseur des grandes dimensions, pour ne pas y faire d'erreur sur le compas à vernier, et l'on conçoit aisément, du reste, que *cette méthode d'imitation* est encore assez rapide pour servir dans les ateliers. Le même moyen s'applique également aux autres figures d'engrenage, en ayant toujours égard aux rapports de leurs nombres de dents et d'ailes avec les longueurs de leurs rayons primitifs.

Observations diverses.

1263. Les proportions de ces engrenages avec pignons de 6, 7, 8 et 9 sont destinées aux rouages qui ont un échappement à repos. Elles sont une modification nécessaire et éprouvée de l'ancienne proportion théorique, où le pignon de 6 commence sa menée avant la ligne des centres, de toute l'épaisseur de son aile, et les suivants de 7, 8, etc. de moins en moins, à proportion inverse de leurs nombres. La proportion ancienne n'a été établie par la théorie que pour les échappements à recul, les seuls bien connus alors, et dont le va-et-vient soulage et dégage sans cesse l'arc-boutement. (Voyez tome 1er, pages 105 et suiv.)

Nous donnerons plus loin cette première proportion théorique, qui convient mieux au recul, surtout pour la roue de champ dont elle facilite davantage le va-et-vient à la fin de la menée du pignon d'échappement. Ce n'est que le grand usage actuel de l'échapp. à cylindre et autres à repos, qui nous a déterminé à commencer par la disposition modifiée exprès pour ces échappements à repos. Vu qu'avec l'ancienne proportion théorique, l'arc-boutement rentrant étant plus considérable, et la marche du rouage n'ayant lieu qu'avec une progression interrompue par les repos, la force motrice est quelquefois suspendue par l'arc-boutement.

1264. Pour refaire à un pignon déjà existant sa roue perdue ou détruite, il faut prendre, avec le calibre à vernier, le diamètre total de ce pignon et l'écrire; ensuite prendre, avec le même calibre, la plus forte épaisseur d'une aile; si l'on soustrait alors l'épaisseur de l'aile du diamètre total, le restant donnera le diamètre primitif du pignon qui ne comprend point les deux arrondis opposés; il faut après multiplier le rayon primitif du pignon, qui n'est que la moitié de son diamètre primitif, autant de fois que le nombre des ailes du pignon est contenu dans le nombre des dents de la roue (nombre connu ou calculé d'avance), et donner à la roue un rayon primitif qui contienne autant de fois ce rayon primitif du pignon. S'il y a des fractions en plus dans ce léger calcul, comme un demi-rayon, un quart, un tiers de rayon primitif du pignon, suite de la fraction qui se trouverait dans le nombre de fois que le nombre des ailes est contenu dans celui des dents, la fraction de longueur sera portée au rayon primitif de la roue.

1265. Mais, quand le nombre d'ailes du pignon est impair, un vide entre deux ailes se trouvant vis-à-vis du plein de l'aile diamétralement opposée, le diamètre total ne peut plus être mesuré directement avec le compas; il faut alors faire dans une lame de laiton, ou au bord du calibre, un trou bien rond dans lequel le pignon puisse entrer juste, sans jeu comme sans effort. On mesure le diamètre de ce trou au moyen d'une longue *jauge* pyramidale plate et mince, dont l'épaisseur est arrondie des deux côtés en demi-cercle; on marque sur la jauge le point de son enfoncement par un trait transversal, et l'on prend avec le calibre la largeur de la pyramide en ce point. Alors on a le diamètre total du pignon, dont on retranche comme ci-dessus l'épaisseur d'une aile, ce qui donne le diamètre primitif du pignon, dont la moitié est son rayon primitif, etc.

1266. Dans nos figures d'engrenage modifié, on peut remarquer que la menée du pignon de 6 ne commence que quand la moitié de l'aile est sur la ligne des centres. Au pignon de 7, ce sont les deux tiers de l'épaisseur d'aile qui se trouvent sur cette même ligne des centres. Au pignon de 8, la ligne des centres est vers les trois quarts de l'épaisseur de l'aile au commencement de la menée. Au pignon de 9, la ligne des centres est vers 7/8es de l'épaisseur de l'aile; enfin, au pignon de 10, la menée peut ne commencer que quand le flanc mené de l'aile est tout à fait sur la ligne des centres, cas où il n'y a plus d'arc-boutement rentrant : mais il faut que les ailes de ce pignon de 10 soient tenues maigres, et que les dents de la roue tiennent du plein, c'est-à-dire soient plus pleines que vides. Or cette indication n'est donnée que par les seules formes pointillées qui corrigent la fig. 2, pl. XXXIV du pignon de 10; car son trait noir ne sert qu'à montrer ici le dan-

ger d'y laisser les ailes du pignon et les dents de la roue trop fortes. On y voit, en effet, qu'alors la moindre inégalité dans les outils à fendre pour les deux mobiles, pourrait aisément produire un accotement dans la rentrée, et qu'en petit, pour Montre, le moindre fétu ou la poussière pourraient y produire de la gêne. Il faut donc y laisser plus de vide, en tenant les ailes et les dents moins fortes, comme l'indiquent les parties pointillées.

1267. C'est à tort que, dans les ouvrages modernes de trop petite dimension, on emploie ce pignon de 10 au centre, où il ne vaut pas celui de 12, vu que l'inégalité des divisions de la denture peut aisément y faire commencer la menée un peu avant la ligne des centres, ce qui perd ainsi une partie de l'avantage que l'on s'en promet. Le pignon de 12 est le premier qui permette le mieux des ailes et une denture solides, avec assez d'ébat dans l'engrenage pour prévenir sûrement toute difficulté. Cet avantage commence même à se faire sentir avec le pignon de 11, peu usité comme on le verra à son article celui de 9 l'est aussi peu, mais l'un et l'autre peuvent être utiles.

De la mesure des épaisseurs d'ailes et des vides des pignons dans l'engrenage modifié par les échappements à repos.

1268. Pour le pignon de 6, du flanc mené d'une aile, au flanc mené de l'aile suivante, il y a 60°; l'épaisseur d'aile en tête est de 20°, et le vide de 40° : la menée ne commence qu'à 10° avant la ligne des centres (*à 10° de moins que par la mesure théorique*).

Pour le pignon de 7, d'un flanc mené à l'autre mené comme ci-dessus, 51° 3/7°; épaisseur d'aile 18°; vide 33° 3/7°; la menée commence à 6° 2/3 avant la ligne des centres.

Pour le pignon de 8, d'un flanc mené à l'autre mené 45°; épaisseur d'aile 15°; vide 30°; la menée commence vers 4° avant la ligne des centres.

Pour le pignon de 9, d'un flanc mené à l'autre mené 40°; épaisseur d'aile 13°; vide 27° la menée commence vers 1° 1/2 avant la ligne des centres.

Pour le pignon de 10, d'un flanc mené à l'autre mené 36°; épaisseur d'aile 11°; vide 25°; alors la menée ne commence que juste sur la ligne des centres.

1269. Nota. Nous n'avons traité jusqu'ici que du cas le plus ordinaire dans les engrenages, de celui où la roue mène le pignon; mais le cas contraire, où c'est le pignon qui mène la roue, sera développé à part, en expliquant pourquoi et de combien le pignon qui mène une roue doit être plus gros, c'est-à-dire être augmenté dans son diamètre total; car pour son diamètre primitif il reste toujours le même que lorsque le pignon est mené. La différence provient uniquement, pour un pignon qui mène, de la forme de son excédant, qui prend alors l'ogive, tandis que la roue menée n'a pour excédant que le demi-cercle. La pénétration d'engrenage au delà des circonférences primitives doit alors différer, mais la distance des centres ne change aucunement. Il en résulte seulement que si le pignon en prenant l'ogive devient sensiblement plus gros ou d'un diamètre *total* plus fort lorsqu'il mène, la roue menée perd au contraire de sa grandeur ou de son diamètre total, par la seule substitution qu'elle reçoit d'un simple demi-cercle, chaque espèce d'excédant passant ainsi d'un mobile à l'autre.

RÉSUMÉ SUCCINCT DES RÈGLES PRINCIPALES DE L'ENGRENAGE.

1270. Le résumé suivant des principes prouvera que notre méthode pratique est bien plus simple qu'elle n'a pu le paraître dans ces premiers articles, et l'on verra à la fin qu'elle est du reste conforme à la démonstration de la *Théorie*.

1271. Toute question d'engrenage se résout par le peu de règles ci-après, applicables à tous les cas, soit que la roue mène, ou qu'elle soit menée, différence qui ne change rien aux rapports *primitifs*, ni à la distance des centres, et ne concerne que le choix obligé de l'une des deux sortes d'excédants, suivant chacun de ces deux cas.

Nous avons déjà dit, et nous ne pouvons trop le rappeler, vu le peu d'habitude de l'observer dans la pratique ordinaire, qu'il faut toujours distinguer dans la roue comme dans le pignon deux sortes de cercles ou circonférences, deux sortes de rayons et deux sortes de diamètres : 1° ceux qui passent ou aboutissent à la base intérieure des arrondis ou *excédants*, au point de leur jonction avec les flancs des dents ou des ailes, et sont appelés *primitifs;* 2° ceux qui passent ou atteignent à l'extrémité extérieure des mêmes arrondis ou *excédants*, et sont appelés cercle *total*, circonférence *totale*, rayon *total* et diamètre *total*. C'est sur ces mesures *totales* que l'on ébauche les roues et les pignons; mais, nous l'avons dit un peu plus haut, il ne faut jamais oublier qu'il n'y a aucune mesure exacte à prendre, ni aucun rapport à établir sur les mesures totales, comme on le fait dans l'usage vulgaire, en se réglant sur la distance, soit du plein des dents, soit de leurs pointes. Tout rapport théorique et seul vrai doit être établi sur les dimensions *primitives*, celles de la théorie, ou des deux rouleaux sans dents dont l'un entraîne l'autre par le seul contact de leurs circonférences. C'est le seul cas auquel on doive ramener toutes les mesures : c'est l'état *primitif* que la théorie envisage comme le seul vrai et certain; et c'est aussi ce qui est observé et maintenu dans les mesures dites *primitives*.

1272. Ainsi, lorsque la distance entre les centres de deux mobiles qui s'engrènent est donnée, et que l'on connaît le nombre voulu des révolutions du pignon pour une seule révolution de la roue, ou, autrement dit, le nombre des ailes du pignon et celui des dents de la roue, il faut :

1° Diviser la distance donnée en autant de parties, *plus une*, que le pignon doit faire de révolutions pour une de la roue, ou, autrement, que le nombre du pignon est contenu de fois dans le nombre de la roue : l'*une* de ces parties formera le rayon *primitif* du pignon, et le reste des parties formera le rayon *primitif* de la roue; ces deux rayons primitifs seront mis juste l'un au bout de l'autre.

Si le nombre des révolutions comporte une *fraction*, la division entre les centres aura lieu avec la même fraction, mais celle-ci restera jointe aux divisions qui forment le rayon *primitif* de la roue.

2° Il faut ajouter ensuite, aux rayons primitifs de la roue et du pignon, l'excédant propre a chacun, suivant qu'il mène ou qu'il est mené, pour avoir par là le rayon *total* de la roue et le rayon *total* du pignon.

3° L'espèce d'excédant qui convient à chaque mobile étant déterminée par sa fonction de mener ou d'être mené, l'excédant qui mène est en ogive, et l'excédant du mobile mené est toujours, dans la pratique, un demi-cercle d'un diamètre égal à l'épaisseur de l'aile ou de la dent du mobile mené, mesurée sur la circonférence *primitive*.

4° Quand on a le rayon *total* d'un mobile, on a, en doublant ce rayon, le diamètre *total* de ce mobile, appelé aussi sa *grandeur* ou sa *grosseur* totale; on aura donc par le diamètre *total*, double du rayon total de chaque mobile, la grandeur de la roue et la grosseur du pignon.

5° La hauteur des excédants de la roue qui mène un pignon dépend principalement du mouvement angulaire de menée de l'aile du pignon, suivant le nombre de ses ailes, et suivant le point du flanc de l'aile où doit se terminer la menée; la grandeur de la roue n'y influe qu'insensiblement. Ce sera le sujet d'une explication particulière, qui peut être suppléée, en attendant, par les figures de nos planches.

6° On aura ainsi, avec les planches, toutes les proportions essentielles de l'engrenage, pour la distance donnée des centres, et le nombre de révolutions demandé.

Nota. Ces sortes d'*aphorismes* devraient pouvoir suffire; cependant nous donnerons dans les articles suivants plusieurs exemples et applications de détail qui achèveront d'en faciliter l'application.

Cette méthode n'a d'autre but que d'établir une exactitude raisonnée dans les engrenages soignés conformément à la théorie qui est exacte et répond à tout. Si cette recherche ne convient point aux simples ouvriers de fabrique, qui tiennent plus aux moyens d'accélération qu'à ceux de précision, elle devrait au moins convenir aux chefs d'atelier qui conduisent le travail et pourraient, par ce moyen, donner de meilleurs modèles de rouages. Pour nous, nous tendons bien moins à accélérer qu'à donner les moyens pratiques d'appliquer les vrais principes. D'ailleurs il convient d'observer que cette application, longue et minutieuse à décrire, deviendra d'une exécution d'autant plus rapide, qu'elle sera mieux conçue, et qu'on en aura contracté davantage la sage habitude. Les artistes instruits et habiles n'y trouveront rien de compliqué, vu qu'ils concevront et exécuteront de suite bien aisément les dispositions conformes aux aphorismes ci-dessus; les autres, avec un peu de patience à lire les détails et à se bien pénétrer de la méthode et des observations qui s'y trouvent jointes, pourront aussi arriver assez promptement à faire aussi exactement à cet égard que les plus habiles.

MANIÈRE DE TRACER SOI-MÊME, EN GRAND, UN ENGRENAGE QUELCONQUE, SANS MODÈLE.

1275. Pour tracer en grand un engrenage quelconque, il faut avoir préalablement choisi et adopté les nombres de la roue et du pignon. En supposant, par exemple, l'en-

grenage à faire d'une roue de 64 dents menant un pignon de 8 ailes, comme dans la fig. 3, on procédera comme il suit : on fixera d'abord sur une ligne verticale tracée sur le papier, ou mieux sur un carton dit *de Bristol*, la distance entre le centre de la roue et celui du pignon, amplifiée dix ou douze fois, ou plus, au delà de celle que permet le calibre vrai du rouage. Ces deux points étant fixés avec exactitude, on en divisera la distance en autant de parties, *plus une*, que le nombre des ailes du pignon est contenu de fois dans le nombre des dents de la roue (soit en nombre rond, c'est-à-dire sans reste, comme dans cet exemple, soit avec une fraction, comme dans d'autres que nous exposerons). Ici le nombre 8 du pignon est contenu 8 fois juste dans le nombre 64 de la roue; il faudra donc diviser la distance entre les deux centres en 8 parties, *plus une*, c'est-à-dire en 9 parties; on aura ainsi par *l'une* entière de ces parties le rayon primitif du pignon, et par le reste des divisions ou les 8 autres parties dont on formera le rayon primitif de la roue : car c'est toujours, comme on va le voir, sur le rayon primitif du pignon, que les grandes comme les petites mesures doivent être prises. Si nous répétons souvent, c'est qu'un faux pli est bien difficile à effacer.

1274. Le rayon primitif du pignon ainsi établi, on tracera de son centre F la circonférence primitive *a b* que l'on divisera en autant de portions de cercle que le pignon porte d'ailes; et comme il y en a 8 ici, la circonférence, qui est toujours de 360°, se trouverait divisée en huit angles de 45° chacun, si on tirait de chaque division une ligne au centre, comme flanc mené d'aile; mais, avant, on observera que, dans notre méthode modifiée, l'aile du pignon en prise ne commence à être conduite avant le centre que d'environ un quart de l'épaisseur de cette aile; on remarquera aussi que le plein de l'aile est la moitié de son vide; en conséquence, on divisera un espace ou une des 8es portions du cercle en 3 parties, et l'une de ces parties en 4, qui sera un 12e de 45° ou très-près de 4° (3° 11/12es), et l'on portera le 12e d'une partie, ou ces 4° à côté de la ligne des centres et à gauche dans la figure en *b*, et ce sera de ce seul point de départ que l'on établira de nouveau une seconde division du cercle en 8 parties, pour y tracer les flancs menés de chaque aile. L'autre flanc de l'aile formant son épaisseur sera tracé à la suite du précédent et occupera le tiers ou 15° de l'espace destiné au plein et au vide d'une aile, ce vide ici de 30° étant toujours double du plein dans les pignons de bas nombre, comme de 6, 7, 8 et 9 ailes (celui de 10 a besoin d'un vide plus grand, comme on le verra plus loin).

1275. On prendra avec le compas la moitié d'une épaisseur d'aile sur sa circonférence primitive *a a b b*; cette ouverture du compas tracera l'arrondi ou *excédant* en demi-cercle de chaque aile, ce qui en augmentera la longueur d'une demi-épaisseur, pour former le rayon total, et du centre F on fera passer sur le sommet de tous les arrondis le plus grand cercle qui représentera la grosseur *totale* *c C d* du pignon.

1276. On fera passer ensuite un 3e cercle *o o* à 7/15es du rayon primitif, mesurés sur ce rayon à partir du centre, et ce cercle qui passera vers *m* et sera interrompu par toutes les ailes, marquera le fond du vide ou de l'enfoncement entre les ailes. Quant au cercle *p p*, c'est celui de la tige; il est indéterminé, parce qu'il suffit que, d'une part, il n'arrive pas tout à fait à la hauteur du fond des ailes, et que, de l'autre part, la tige ne soit pas assez

faible pour se tordre ou fléchir. Avec toutes ces conditions le pignon se trouvera tracé en grand.

1277. Pour la roue, on en tracera d'abord la circonférence primitive passant au bout de son rayon primitif en *b*, au moyen d'une ouverture de compas, prise du centre de la roue en G (G E étant ajouté en ligne droite à *b* E), jusqu'à son point de contact *b* avec la circonf. primit. du pignon sur la ligne des centres. Ensuite on abaissera de *b*, point commun d'intersection, la perpendiculaire *b r*, tombant en un point cherché comme *r* qui permette à cette perpendiculaire de passer juste, d'après un moyen connu, par ledit point de contact ou d'intersection, et ce point *r* déterminera celui du flanc de pignon où doit finir la menée de l'aile F *r*, et donnera par suite la hauteur de l'ogive de la roue, en dehors et en surplus de sa circonférence primitive; or ce ne sera pas du point *r*, mais d'un point *u*, du cercle *u n*, plus bas que *r* de 2/10es de la longueur F *r*, que l'on tirera de *u* jusqu'au centre G de la roue, un rayon provisoire qui sera le milieu de la dent finissant de mener. (Nous dirons ailleurs le motif de cette substitution de *u* à *r*.)

1278. On divisera ensuite au compas, soit une demi-circonférence primitive de la roue en 64 parties, soit seulement 1/4 de cette circonférence primitive en 32 parties, et la moitié d'une de ces parties, portée sur l'intersection du rayon provisoire avec la circonférence primitive, sera marquée de *s* en *t* et en *t'*, ce qui déterminera la largeur de la dent; puis, prenant pour centre le point *i*, on fera passer un arc de cercle par les points *u* et *t*, qui remplacera la courbe théorique. Pour l'imiter mieux, on pourra abaisser assez le centre *i* pour que son rayon, devenu un peu plus long et atteignant toujours au point *u*, tombe un peu (comme ici d'un quart de ligne) en dehors du flanc *t*, *x* de la dent; puis, pour raccorder le cercle avec le flanc *tx*, on cintrera davantage et peu à peu, à la main, un tiers inférieur de cette portion de cercle, et de plus en plus pour le faire arriver juste sur le flanc *t* et y éviter un *jarret;* car la courbe théorique est de plus en plus cintrée vers *t*, d'où elle se redresse insensiblement en arrivant au sommet *u* de l'ogive. On peut la comparer au commencement d'un demi-ovale, dont l'extrémité du grand diamètre horizontal aboutirait en *t*. On formera l'autre côté de l'ogive, le flanc *t' z*, et sa courbe de *u* en *t* au moyen du centre *k*, et de la même manière. On abaissera du point *b* de 1er contact un autre flanc *b y;* on y portera à la suite l'une de l'autre les deux distances semblables *t s*, et *st'*, et l'on établira de même la largeur, les flancs et l'ogive de la dent *g* qui va commencer à mener, et ainsi des autres dents. Si l'on est parti du point *b* pour diviser la roue, et si l'on veut que les dents aient autant de vide que de plein, les 128 divisions établies sur la roue (à la circonférence primitive) seront celles de tous les flancs des dents tirés droit au centre de cette roue. La courbe ne doit, dans aucun cas, descendre sur le flanc au-dessous de la circonférence primitive. Dans l'exécution, des limes à arrondir bien choisies peuvent former cette modification de la courbe avec assez de succès, et rendre toutes les retouches égales.

1279. Dans la figure 3, les dents sont un peu plus vides que pleines; si l'on veut les faire ainsi, on divisera seulement la roue par les centres des dents, à partir du rayon provisoire *u s*, puis on portera à droite et à gauche de chaque division les lar-

geurs *st* et *st'* qui sont chacune les 3/17 du rayon primitif du pignon. On peut du reste faire les dents plus larges et même égales à leurs vides, si l'on est assuré d'obtenir une juste division sur une bonne plate-forme. La dimension actuelle des dents dans la figure n'est adoptée ici que pour prévenir les inégalités trop communes dans les plates-formes ordinaires.

Le reste de largeur laissé au limbe de la roue, entre les cercles H, H et L, L égale environ une fois et 1/4 la hauteur de toute la dent, flanc et ogive compris. Quand on aura tracé intérieurement au limbe ses rayons ou barrettes qui le rattachent à son centre, il ne restera qu'à mettre à l'encre les formes qui doivent être exécutées, et à pointiller les autres lignes et cercles de principes. Pour exécuter en petit, on emploiera les échelles et outils indiqués précédemment, ou bien on procédera, sans dessins, par les moyens arithmétiques dont nous allons bientôt exposer le calcul.

1280. La raison du peu d'effet sur les dentures, d'un changement très-notable dans le diamètre de la roue, que nous avons marqué au pointillé dans la figure du pignon de 8, provient de ce que deux circonférences de dimensions très-différentes tracées l'une dans l'autre, et se touchant par un point de leurs bords, se confondent au delà de leur point de contact assez sensiblement pendant quelques degrés; aussi trouve-t-on dans cette figure une différence très-peu sensible entre les excédants de la roue de quatre pouces de rayon et ceux de la roue de huit pouces; quant aux distances entre les dents, elles sont les mêmes à la circonférence primitive de la roue, puisque la circonférence de celle-ci reste toujours proportionnelle au nombre de ses dents.

1281. On a vu, au début de ces articles, que les savants qui ont traité ce sujet suivant la théorie, les divers artistes qui l'ont rapportée, et les mécaniciens instruits qui ont pu vérifier les principes par l'expérience, s'accordent sur le besoin absolu d'une transmission uniforme de la force motrice par les rouages, tant pour éviter un surcroît momentané et périodique de puissance, qui use et détruit les unes par les autres les parties frottantes, que pour prévenir les *précipitations*, les *glissements* et les *chutes* des dents, par suite de leur mauvaise forme, effets nuisibles à la régularité des résultats attendus. Il ne faut pas s'imaginer que les engrenages les mieux faits, suivant toute la rigueur des principes théoriques, agissent sans frottement dans leurs dentures, même à part celui de leurs pivots. Il y a un frottement très-sensible dans la menée, où les points en contact se déplacent par une traînée continue, et à la fois sur l'aile de chaque pignon. C'est donc à tort que quelques-uns ont cru n'y voir qu'un simple développement de rouleau, qui aurait encore ses inconvénients particuliers dans les cas de peu d'intensité de force (et nous le ferons remarquer, surtout aux articles des échappements); il y a dans la menée une traînée manifeste, puisque les divers points d'une longue partie de la courbe des ogives agissent successivement sur une étendue beaucoup plus courte du flanc de l'aile, ce qui ne peut avoir lieu sans glissement, et par suite sans frottement. Or, il importe d'atténuer et de régulariser ces effets le plus possible, et presque autant que de prévenir des causes d'arrêt; car celles-ci,

se manifestant presque toujours dans les premières épreuves des ateliers, peuvent être corrigées de suite avec sûreté, et, dans ce cas, un défaut connu et corrigé est une conquête; mais quand les parties s'usent à la longue, on ne s'en aperçoit que par un excès tardif, auquel il n'est souvent plus temps de remédier autrement qu'en remplaçant entièrement les pièces usées par d'autres nouvelles.

1282. Nous traiterons plus loin des pignons de haut nombre, comme ceux de 10, 11, 12, 16, etc., menés uniquement après la ligne des centres et dont l'arrondi des ailes ne sert plus qu'à prévenir l'encochement que leur angle d'acier trempé, sans arrondi suffisant, produirait à la longue sur la matière moins dure des dents de la roue, en sorte que, dans ces pignons nombrés, l'arrondi n'est plus qu'une forme de précaution. On verra aussi par la suite qu'il y a pour l'augmentation du nombre d'ailes une certaine limite qu'on ne dépasserait pas sans inconvénient. Le mieux est presque toujours dans les moyens termes, et les excès en tout genre sont désavantageux, en mécanique comme dans le sens moral.

1283. On doit toujours considérer, dans le sujet qui nous occupe ici, que toutes les règles dérivent d'un premier principe, qui est l'état primitif supposé de disques ou rouleaux sans dents, dont un roulant entraînerait l'autre par le seul contact de leurs circonférences. C'est sur ces disques que sont prises les proportions fondamentales; celles que nous appelons *primitives* dans les mobiles ne proviennent que des *rapports* entre ces disques, rapports qu'il faut toujours retrouver et distinguer dans un engrenage (1).

1284. Car la circonférence primitive d'un mobile menant étant représentée par un disque dont les bords sont supposés unis et sans dents, si on ajoute, par la pensée, au dehors de cette circonférence unie, des excédants en ogive, il faut aussi supposer à la

(1) Cette considération s'appuierait aisément, du reste, par l'expérience. De pareils disques en bois et sans dents, composés probablement de claveaux dont le fil est dirigé suivant leurs rayons, sont employés dans un moulin à scier de la ville anglaise de Southampton, dans le Hampshire. D'autre part, nous avons vu un pyromètre sans denture composé par feu M. Vincent, directeur de l'ancienne manufacture d'horlogerie de Belleville, près Paris, déjà cité t. Ier, p. 109; chaque rouleau y a sa chape particulière, mobile elle-même sur pivots, et qu'un ressort oblige d'appuyer son rouleau sur le rouleau suivant, servant de pignon, etc. Cette machine fonctionne sans dents et sans glissement. Les épaisseurs sont seulement adoucies en travers. A la vérité, elle n'éprouve d'autre résistance que celle de ses pivots, du poids et de l'inertie des mobiles, et d'une aiguille très-légère. On conçoit qu'il pourrait y avoir quelques glissements dans cette sorte d'entraînement par contact, si la résistance au mouvement transmis était plus forte, et qu'en pareil cas les dentures sont le seul moyen d'y obvier sûrement. Aussi ce moyen mécanique est-il indispensable dans presque toutes les machines de précision, ce qui oblige d'en étudier attentivement les règles, trouvées si heureusement par la théorie, c'est-à-dire par l'application de la cycloïde.

Dans quelques grosses machines qui n'exigent pas de précision, où le glissement serait de peu d'importance, les disques pourraient être enveloppés de cuirs élastiques pour éviter à la fois le glissement et la dureté des soubresauts dans les mouvements rapides. Ce moyen se rapprocherait de l'usage des sangles ou lanières de cuir, qui communiquent le mouvement de la poulie d'un axe à celle d'un autre, entraînée par la seule adhérence des surfaces en contact, etc. Du reste, ces exemples sont plus que suffisants pour appuyer la supposition ci-dessus de la théorie, puisque leur réalisation a pu servir utilement.

circonférence primitive et unie de l'autre mobile mené, et en dedans de cette circonférence, des enfoncements dont les côtés ou flancs soient dirigés vers son centre. Alors on conçoit que les excédants du premier disque menant devront pénétrer dans les enfoncements du second disque mené, et former un engrenage qui préviendra le glissement de circonférences unies, en cas de résistance du mobile mené. Quant aux excédants en demi-cercle du mobile mené, ils doivent être également reçus ou logés dans des vides pratiqués de même entre les côtés ou flancs des ogives du mobile menant, et qui, se trouvant en dedans de sa circonférence primitive, seront également dirigés vers son centre. Ce seront ces flancs de la roue, au-dessous de ses ogives, qui agiront sur la naissance des demi-cercles des pignons de bas nombre conduits avant la ligne des centres, comme les ogives de la roue mèneront, après la ligne des centres, les flancs du pignon. Ces saillies ou excédants des mobiles et leurs enfoncements réciproques formeront, pour la roue, ses dents composées de flancs droits surmontés d'excédants en ogive, et pour le pignon, ses ailes dont les flancs droits seront dirigés à son centre et seront terminés par un demi-cercle remplaçant ici suffisamment la véritable courbe théorique qu'il y faudrait aussi à la rigueur ; et c'est précisément la quantité dont les excédants de la roue et les arrondis du pignon se dépassent mutuellement, qui forme ce qu'on appelle la quantité de *pénétration* de l'engrenage. Or, pour que les excédants en ogive de la roue mènent uniformément le flanc droit des ailes du pignon, la théorie leur a appliqué fort heureusement les propriétés de la courbe épicycloïdale, dont cette propriété, remarquable entre autres, était déjà connue, mais sans cette application; son effet si avantageux sera plus développé dans la démonstration finale que nous donnerons de cette théorie.

NOTA. Avant de passer à la méthode arithmétique pour établir de prime abord et par le seul calcul les dimensions réelles et effectives d'un engrenage, tel qu'on le veut exécuter, sans en tracer la figure en grand, ce qui suppose ici dans l'esprit de l'Artiste une suffisante pénétration des principes exposés, nous allons rappeler quelques observations très-antérieures du 1er volume que l'on pourrait avoir oubliées; ce sont celles qui, dans les premières lignes de ce chapitre, portent la recommandation toujours utile de revoir les pages 99, 105 et suiv. de l'Introduction du 1er volume ; mais nous avons pensé qu'il serait plus commode d'en trouver ici une sorte de résumé, vu que, d'ailleurs, la variété d'expressions dans un article répété contribue d'ordinaire à l'éclaircir,

1285. Dans l'un de ces articles, celui du 1er emploi de la *Cycloïde* par *Huyghens*, tout en avouant les inconvénients qui en ont fait abandonner l'application au Pend., quoique le principe théorique fût excellent, on a indiqué aussi ses avantages réels dans la théorie et la pratique de l'engrenage ; on y a fait remarquer que cette courbe se trouve naturellement tracée par un point donné d'un cercle roulant sur un plan droit horizontal, et en même temps au long d'une face verticale au plan, sur laquelle ce point donné du cercle tracerait une courbe, une espèce de demi-*ovaloïde*. C'est en effet ce que produirait un clou en dehors de la jante d'une roue de voiture, ou une tige implantée extérieurement et de côté au bord de cette roue, roulant sur un plan et au long d'un mur

voisin, si cette tige atteignait le mur de manière à y tracer la courbe qu'elle décrit pendant la progression de la roue, c'est-à-dire pendant le développement de sa circonférence sur le terrain. Une telle rotation, prolongée avec ces conditions, tracerait sur un long mur une suite de festons demi-ovales relevés qui se joindraient dans le bas en un point commun et en y formant les sommets d'autant d'angles curvilignes, tandis que le point le plus élevé de chaque courbe serait ce qu'on nomme aussi *le sommet* d'autant de *Cycloïdes*.

1286. Or le même cercle, roulant, non plus sur une surface inférieure rectiligne, mais sur une surface convexe ou sur la circonférence d'un autre cercle, produit aussi par un point donné une courbe analogue à la précédente ; mais la seconde est plus cintrée, et est nommée une *Épicycloïde* ou un *Épicycle* (un *sur cercle*). Cet Épicycle a comme la Cycloïde la propriété d'avoir toujours une portion infiniment petite de sa courbe sensiblement perpendiculaire à chaque rayon successif, tiré de chaque point de contact de la roue sur sa base droite ou courbe, jusqu'au point décrivant : nous disons une portion infiniment petite perpendiculaire, parce que les divers points de la courbe sont considérés alors comme des lignes droites infiniment petites, successivement parallèles au flanc droit de l'aile du pignon que le crayon décrit en même temps, en supposant que le cercle primitif du pignon se déroule en même temps sur la base commune, c'est-à-dire sur le cercle primitif de la roue qui le mène. Cette supposition est du reste admise théoriquement, pour comparer par approximation un cercle à une ligne droite, avec laquelle une courbe ne peut avoir de rapport connu que suivant une telle supposition. C'est d'après cette propriété, que l'on pourrait peut-être dire ici *virtuelle ou comme en tendance*, que l'Épicycle est appliqué par la théorie à la dent d'une roue menant le flanc droit de l'aile d'un pignon, et il en sera fait une mention plus explicite dans la démonstration toute théorique qui terminera ces articles d'engrenage.

1287. Des Artistes pénétrés de l'utilité de la théorie, ont déjà tenté, dans ces derniers temps, de composer un outil ou machine propre à donner régulièrement, à l'excédant des dents mobiles qui mènent, la courbe épicycloïdale : la solution mécanique de ce problème ne nous a pas encore paru complète ; mais, si on achève de perfectionner ce moyen d'une manière usuelle et applicable en très-petit, nous en ferons part à nos lecteurs en leur désignant nominativement ceux à qui le succès en sera dû. Nous ne dissimulerons pas que cette solution devient difficile comme construction, surtout quand il s'agit de l'appliquer aux plus petites dents des roues de Montre. En attendant ce succès important pour l'engrenage, nous avons dit et même éprouvé que l'on pouvait y employer, comme appréciation déjà fort satisfaisante, une portion de cercle d'un diamètre approprié, qui, avec quelques soins, peut remplacer passablement la courbe théorique, même pour des rouages de précision. Mais comme il peut devenir essentiel de savoir tracer en grand la véritable courbe, et que nous en avions donné un moyen pratique dans les articles rappelés ici, nous allons en rapporter les moyens graphiques. *C'est déjà une preuve de capacité dans son art que de s'occuper de cet outil.*

1288. On tracera le plus en grand que l'on pourra, sur une feuille de fort papier, des

portions suffisantes des cercles primitifs de la roue et du pignon, absolument comme nous les présentons dans nos figures d'engrenages et avec les mêmes conditions de nos aphorismes (pages 237-238 ci-dessus et suite). On divisera ce cercle primitif en deux fois autant de flancs que la roue aura de dents; l'on en marquera les divisions sur le cercle primitif tracé, et en nombre proportionnel à l'étendue de ce secteur de cercle; une des divisions des flancs devra se trouver sur la ligne des centres. Il faudra en outre tracer dans le pignon et sur la ligne des deux centres un autre cercle plus petit de moitié, c'est-à-dire ayant pour diamètre le seul rayon primitif du pignon : c'est le cercle *générateur* traçant la courbe des dents et en même temps les flancs droits au centre des ailes du pignon. Le centre du cercle générateur, qu'on nomme aussi disque ou roulette, sera placé sur la ligne des centres à la hauteur nécessaire pour que la partie supérieure de sa circonférence coupe le centre du pignon, tandis que son point diamétralement opposé passera au point commun d'attouchement de la roue primitive avec son pignon primitif sur cette ligne des centres; car il faut que les centres de ces trois cercles soient exactement sur cette ligne, et que leurs trois circonférences se confondent exactement au point commun d'attouchement, comme il a été dit et vu aux articles précédents concernant nos figures, page 338 et suite. On trouve ces trois cercles tracés ainsi, suivant leurs vraies positions, dans la fig. 33, pl. XXXIV de l'engrenage du pignon de 11 ailes, mené par une roue de barillet de 132 dents, dont un tour en produit douze au pignon. Le dessin en fut fait exprès pour l'exécution. Il faut ensuite se munir de l'appareil simple suivant :

Une portion suffisante de cercle du même rayon que la portion de roue tracée sera pratiquée, au moyen du tour, au bout d'une planche de noyer d'environ un pouce d'épaisseur et de neuf à dix pouces de largeur, représentant la partie extérieure et primitivement tracée du limbe de la roue; la planche sera assez longue pour porter aussi le centre de la roue, point où elle sera percée d'un trou traversé à frottement doux par un axe quelconque, tel qu'un arbre lisse de longueur suffisante pour pénétrer la planche et la table, où il sera fixé au centre aussi de la roue tracée.

On fera encore tourner un disque de bois dur, du diamètre juste du cercle générateur tracé ci-dessus, et de même épaisseur que la planche, ces épaisseurs seront coupées à angle droit avec les surfaces; le cercle générateur sera garni à l'un des points de sa circonférence d'un crayon dur dont la pointe coïncidera exactement avec le bord de ce cercle ou roulette. La pointe n'en sera taillée que du côté intérieur ou du centre du cercle, en sorte que le reste du crayon ne formera point d'épaisseur en dehors du cercle générateur (1). Celui-ci, en développant par simple attouchement sa circonférence sur celle

(1) Un caractère d'imprimerie peut y servir, si sa matière est assez tendre pour colorer sa trace sur un papier bien collé. D'ailleurs, elle produirait assez de trait en simple enfoncement du papier pour en suivre la trace au crayon ou à la plume. Cette pièce peut être logée à queue d'aronde dans l'épaisseur du disque, de manière à en effleurer juste la circonférence, et sa pointe peut être taillée tout en dehors au niveau de cette circonférence. Au reste, si l'on se borne au simple trait enfoncé sur le papier, une pointe de laiton ainsi ajustée peut très-bien y suffire.

primitive de la roue en bois, tracera ainsi l'épicycloïde ou ogive à partir de chaque flanc sur lequel la ligne des centres de la planche sera transposée. Cette ligne des centres de la planche sera en conséquence tracée sur elle avec son retour d'équerre sur l'épaisseur, afin de faire correspondre successivement cette ligne des centres sur chaque division de flanc, marquée sur le cercle primitif de la roue tracée sur le papier. Le diamètre du cercle générateur, partant de la pointe décrivante, passant au centre de la roulette et marqué également sur son épaisseur, servira à ramener son point de contact sur la ligne des centres de la planche, pour, en le faisant rouler dans le sens voulu, tracer une épicycloïde, un peu plus étendue qu'il ne faut d'abord, sur le flanc de la dent qui touche à la ligne des centres du papier; puis, ayant transporté le système sur l'autre flanc, après avoir ramené la roulette à sa première place de contact et en établissant la ligne des centres de la planche et de la roulette sur la division de ce second flanc, on fera tourner la roulette en sens contraire, et sa pointe tracera l'autre épicycloïde, allant se croiser sur le surplus du trait de la première.

1289. Il est entendu que, dans ces mouvements de la roulette, elle ne doit que se développer et ne point glisser; or, pour assurer cet effet, on usera de l'artifice suivant qui est facile à établir : on enveloppera la roulette de deux portions d'un petit ruban mince et étroit nommé *faveur*, roulées sur sa circonférence et tout près de chaque bord de son épaisseur, et l'on en collera ou assujettira les bouts vers le point diamétralement opposé à celui du crayon; ces rubans seront ensuite enroulés librement sur le disque, en laissant entre eux un intervalle plus que suffisant pour y placer un troisième ruban collé de même, mais enroulé en sens contraire. Ces trois rubans iront se croiser sur le point du crayon et s'étendront de là jusqu'aux deux extrémités de la portion de roue, où, bien tendus, ils seront arrêtés et fixés.

On conçoit que, par cette disposition, la roulette pourra se développer sur le limbe dans les deux sens, et que, quand elle avancera d'un côté en se dégageant par exemple de ses deux rubans des bords, qu'elle laissera s'appliquer sur le limbe, elle s'enveloppera au contraire du 3e ruban; l'effet opposé aura lieu de même dans l'autre sens, et, en roulant ainsi, elle ne pourra éprouver de glissement; en un mot, cet artifice représentera parfaitement l'engrenage infiniment petit de *Camus*, cité précédemment (3e alinéa du paragraphe ou article 1246). On aura le soin, en conduisant la roulette, de la tenir constamment appuyée contre le limbe, et l'on pourra même lier en ce sens les deux mobiles, au moyen de l'élasticité d'une corde fine de boyau tendue de l'axe de la roue en planche à celui de la roulette, tant en dessous qu'en dessus, en laissant à la corde la liberté de changer de place comme un rayon mobile, etc.

Le rayon de la roulette devrait à la rigueur être diminué de l'épaisseur d'un ruban, mais, en grand, cette différence presque insensible peut être négligée; cependant il conviendrait d'y avoir égard si le ruban avait une assez forte épaisseur.

En arrêtant les bouts des rubans aux extrémités du limbe, on aura soin que le crayon ou point décrivant et le diam. de la roulette prolongeant celui de la planche tombent juste sur la ligne des centres du dessin représentant la roue, et que, en déplaçant pour

chaque flanc le limbe en bois, son rayon du milieu soit bien ajusté sur la ligne du flanc de la roue, etc.

1290. Quant à l'imitation en petit de la courbe ogive des dents, obtenue par ce procédé et exécutée autant que possible au moyen de l'outil à arrondir (car aujourd'hui on n'arrondit plus à la main, opération qui exigeait anciennement une constante habitude), on pourra y utiliser le moyen *optique* dont nous avons déjà parlé ci-dessus (art. 1256), pour soigner davantage la rectification de la denture. On place le dessin en grand contre un mur vertical, et à la hauteur de l'œil; on se pose en face en tenant à la portée de l'un des yeux muni d'un microscope une dent presque terminée; en dirigeant en même temps l'autre œil sur le dessin, on aperçoit, après quelques essais, les deux images, qu'il est aisé de faire coïncider ensemble ou de rapprocher seulement par leurs bords, en sorte que l'on peut apercevoir les points où l'exécution de la courbe s'écarte du tracé; on les corrige avec des limes à arrondir choisies pour ne mordre qu'aux points qui le requièrent; et, par le moyen de l'outil, on obtient une correction uniforme sur toutes les dents. Il est entendu que ces moyens recherchés ne conviennent qu'à des cas qui demandent une extrême précision; nous ne les proposons que dans ce sens et après les avoir employés avec succès. *On tâte aussi la distance voulue.*

1291. Nous avions donné par anticipation, dans la planche II du 1er vol., fig. 12, la proportion du pignon de 6 proposée par F. Berthoud, pour relever les difficultés de son exécution; cette gravure en a même adouci les défauts, car les ailes de ce pignon sont encore plus maigres et les dents de la roue plus larges dans la planche de l'*Essai* de Berthoud, dont l'intention paraît avoir été celle de réduire, par cette proportion, la menée rentrante et arc-boutante avant le centre ou *avant la ligne des centres*; et comme il est évident que la trempe ferait souvent *voiler* les ailes d'un tel pignon, trop faibles d'ailleurs pour une force motrice moyenne en l'employant aux second et troisième mobiles du rouage, en cas de rupture du ressort ou de la chaîne, qui occasionnent souvent des secousses et contre-coups dangereux, et comme on ne trouverait pas non plus des limes usuelles applicables à la denture de sa roue, nous avons donné tout auprès, et comme comparaison, la figure 13 de la même planche, qui présente une proportion du pignon de 6 bien plus praticable, avec les autres avantages désirés, ou du moins suffisants dans l'usage ordinaire, et c'est ce que nous allons expliquer un peu plus loin (1294).

1292. Avant de traiter ce sujet, nous insisterons encore ici, comme nous l'avions fait dans les articles que nous rapportons, sur le grave défaut, trop commun aujourd'hui, de ne faire commencer la menée des pignons de bas nombres que quand le flanc mené de leur aile est arrivé sur la ligne des centres, dans l'intention d'en prévenir tout à fait l'arc-boutement, et l'on en a déjà remarqué tous les inconvénients.

Car la menée uniforme de 60° du pignon de 6 est impossible avec cette fausse méthode moderne, qui produit inévitablement vers la fin de sa menée une augmentation considérable de force, avec glissements et chutes, dont l'effet est d'user rapidement les pignons et les trous des pivots, si ces trous sont dans le laiton, et les pivots eux-mêmes, surtout si les trous sont garnis en pierre, et de plus les parties importantes de l'échappement. Or,

dans l'engrenage de la roue de champ avec le pignon d'échappement, un tel moyen s'oppose bien plus directement au recul de l'aile du pignon, contre lequel la roue arc-boute beaucoup plus, qu'elle n'aurait eu de difficulté dans sa rentrée en arc-boutant à l'ordinaire avant le centre, effet que le recul soulage et facilite suffisamment à la rentrée, mais nullement à la fin de la menée, lorsqu'elle va trop loin; il y a donc désavantage général et augmentation d'usure, soit des palettes de verge, soit des diverses parties de toute espèce d'échappement.

1293. La quantité de 20 degrés de menée avant le centre pour le pignon de 6 n'a été admise que moyennant le recul, et mieux encore avec celle moindre des pignons de 7 et de 8. On a déjà vu que, si la théorie a toléré les pignons au-dessous de 10, c'était avec la condition du recul qui existait dans toutes les pièces d'horlogerie, avant l'usage des échappements à repos, ou du moins lorsqu'ils étaient encore trop rarement employés. Pour ne pas agir avant le centre et mener néanmoins régulièrement, il faudrait aux pignons de bas nombre des ailes si maigres, que celles du pignon de 6 se réduiraient à la simple ligne mathématique et que leur épaisseur disparaîtrait entièrement. *Nous insistons exprès sur ces observations.*

1294. Ainsi l'on doit suivre les mesures théoriques avec l'échappement à recul, pour lequel ces mesures ont été établies, et nous donnerons à part celles de *Camus* pour cette seule considération ; car il faut employer chaque propriété à la place qui lui convient, et ne pas intervertir des mesures raisonnées et fondées sur la nature du sujet. Si nous avons modifié la menée avant le centre, c'est uniquement pour les échappements à repos si généralement usités depuis quelques années. C'est ce qui nous avait fait placer par anticipation, dans notre planche II, la figure modifiée de notre pignon de 6 d'une bonne proportion ordinaire, mené par une roue de 54 dents, nombre à peu près moyen entre ceux employés communément. Dans ce sens, et en raison des nombres, nos proportions des pignons de 7 et de 8 sont encore meilleures. Le modèle très-exact de celui de 6 de cette planche II nous a réussi parfaitement. Il ne diffère pas d'avec celui de 6 de la planche XXXIII, sauf peut-être le retrait inégal du papier. Du reste, ses ailes sont fortes, leurs vides sont un peu plus profonds que d'ordinaire, pour y éviter l'accotement de la pointe des dents de la roue, pointe que d'ailleurs il importe beaucoup de conserver. La denture de la roue est autant pleine que vide; la hauteur de l'excédant de la roue au delà de sa circonférence primitive est juste la moitié du rayon primitif du pignon; la courbe ogive de cet excédant est formée par une portion d'un cercle, dont le centre, pris sur la circonférence primitive de la roue, est au premier et au dernier sixième de l'espace entre deux flancs de dents. La dent B n'entre en contact avec la naissance *a* de l'arrondi de l'aile, que quand le milieu de l'épaisseur de cette aile arrive sur la ligne des centres O A, moment où le dent C finit sa menée en *b* sur le flanc de l'aile qui lui correspond. Il y a donc ici 10° d'arc-boutement, ou frottement rentrant, de moins que si la menée commençait avant la ligne des centres de toute l'épaisseur de l'aile, qui a néanmoins ici toute sa force, celle ordinaire de 20°. Si la puissance y a quelque avantage sur la fin de la menée portée plus loin, il se trouve compensé par le plus de hauteur de

l'excédant, ce qui affaiblit proportionnellement la puissance du levier de la roue, de sorte qu'il y a équilibre très-rapproché entre ces deux effets. La menée se termine suffisamment avant l'extrémité du flanc pour prévenir les chutes, lors même qu'elle serait employée avec un ancien pignon de la forme vicieuse dite *grain d'orge*, pourvu qu'il soit du reste de grosseur convenable, mais cette mauvaise forme produirait toujours quelque glissement avec augmentation de force.

1295. Le rayon primitif de la roue de 54 dents qui aboutit en O n'a pu être tracé en entier, mais on conçoit aisément qu'il doit contenir neuf fois le rayon primitif A O du pignon, ainsi qu'il est coté sur la planche II, et conformément au rapport entre les nombres, dont celui de 6 ailes du pignon est contenu aussi 9 fois dans le nombre 54 des dents de la roue ; il y a conséquemment, entre les deux centres, la longueur de 10 rayons primitifs du pignon. L'espace, ou l'ébat, entre le revers de la dent rentrante et celui de l'aile suivante, suffit pour prévenir sûrement leur accotement latéral, par suite des inégalités présumables des divisions d'une plate-forme commune. On pourra s'appuyer avec confiance sur le trait fort exact de la figure 13, pl. II, pour la réduire en petit.

1296. Les mêmes avantages, nécessités par les échappements à repos, se trouvent encore mieux ménagés dans nos pignons modifiés de 7, 8, 9 et 10. Mais nous devons rappeler que ces proportions moyennes ne conviennent nullement à l'engrenage de roue de champ, dont elles gêneraient davantage le recul nécessaire. On peut les employer avec les autres mobiles, qui, moins éloignés de la force motrice, éprouvent aussi moins de recul. Chaque construction ne doit être appliquée qu'à sa destination. Celle-ci a été essayée avec succès par les rouages d'échappements à repos, sujets à s'arrêter quand les engrenages éprouvent trop d'arc-boutement. Tel est l'abrégé des observations anticipées de l'Introduction du 1er volume, citées en tête de ce chapitre, qui ont le plus de rapport avec notre sujet actuel, et qu'il était plus commode de retrouver ici.

Du calcul arithmétique de l'engrenage.

1297. Les articles suivants paraîtront, au premier aperçu, longs et compliqués ; mais, si l'on remarque que, traitant la question pour la première fois et voulant la mettre à la portée des lecteurs peu versés dans ce calcul, nous nous trouvons obligé à des détails et répétitions multipliés, bien que nous en ayons supprimé les opérations communes sur les fractions que l'on est au moins censé savoir, on ne sera plus étonné de ces longueurs. En faisant abstraction de tous ces détails nécessaires à ceux qui commenceront à pratiquer la méthode, on trouvera que, aux calculs près des fractions, elle est, du reste, presque aussi simple que celles précédentes d'imitation et de réduction.

Il convient de distinguer, dans le calcul de l'engrenage, le rapport entre le nombre des dents de la roue et celui des ailes du pignon, ou, ce qui revient au même, le rapport entre les grandeurs de leurs rayons *primitifs*, qui en sont la conséquence,

d'avec le rapport entre les *révolutions* du pignon et celles de la roue. Ces deux rapports, l'un des nombres ou des grandeurs de deux mobiles, l'autre de leurs révolutions, sont toujours en sens inverse l'un de l'autre. Si une roue porte 42 dents et mène un pignon de 6, le nombre des dents de la roue contiendra 7 fois le nombre des ailes du pignon, de même que la longueur du rayon principal de la roue contiendra aussi 7 fois la longueur du rayon principal du pignon ; mais si l'on compare les révolutions des deux mobiles, ce sera le pignon (7 fois plus petit que la roue) qui fera 7 fois plus de révolutions qu'elle, c'est-à-dire que le pignon fera 7 révolutions pour une de la roue. Ainsi le rapport entre les révolutions des mobiles est *inverse* du rapport entre les nombres ou les grandeurs primitives ; et avec les rapports des nombres ou grandeurs on trouve les révolutions en les comptant en sens contraire ; ou, si on a les révolutions, on en conclut, en sens contraire, les rapports des nombres comme aussi des grandeurs ; on voit encore que, quand les grandeurs ou les nombres d'un mobile diminuent relativement à ceux de l'autre, les révolutions du mobile diminué s'en augmentent à proportion.

1298. Parmi nos observations, plusieurs d'entre elles portent une apparence d'abstraction qui ne sera pas goûtée de tous les lecteurs ; mais ceux qui veulent s'instruire solidement doivent les lire avec patience ; quoiqu'elles puissent d'abord paraître obscures, on en conçoit toujours quelques parties ; les unes éclaircissent les autres peu à peu, et leur suite les fera mieux comprendre quand on y reviendra, car il faut relire les passages difficiles plus d'une fois. Les divers rapports, les précisions, l'exactitude, les combinaisons, etc., de l'horlogerie ne s'obtiennent pas sans des efforts d'attention et d'analyse. Les échappements, dont nous traiterons à la suite du sujet actuel, nous en fourniront d'autres preuves.

C'est en raison de ces difficultés, plus faciles au fond à surmonter qu'on ne le croit d'abord, que nous avons donné en premier lieu une méthode de simple imitation par la réduction si aisée à pratiquer de nos figures ; nous avons ensuite indiqué la manière de les tracer soi-même pour les divers cas, ce qui demande que l'on soit plus initié. Nous allons maintenant passer à la méthode purement arithmétique, qui n'est guère plus difficile, et au moyen de laquelle on établit directement les mesures vraies sur le calibre, sans s'astreindre à en tracer avant la figure en grand.

CALCUL *pour établir directement sur le calibre les mesures vraies de l'engrenage du pignon de* 6, *mené par une roue de* 42 *dents.*

1299. Nous procédons maintenant à l'application directe de notre méthode arithmétique par l'exemple le plus simple, déjà connu dans nos premiers articles de ce chapitre, celui de notre fig. 1re du pignon de 6, pl. XXXIII, en prenant pour distance donnée des centres 8 lignes juste, ce qui suppose une roue d'environ 15 lignes de diamètre total, convenable, sous ce seul rapport, à un mouvement de pendule, sauf le nombre actuel de dents qui, pour pendule, seraient en plus grand nombre, et produiraient

d'autant plus de révolutions au pignon pour une de la roue; mais cette différence ne change rien à notre méthode de calcul, à établir, du reste, en conséquence de chaque nombre.

On tracera légèrement sur la plaque mince de laiton bien dressée, adoucie, presque polie et servant de calibre, une ligne des centres d'environ 18 lignes de longueur, comme nous l'avons recommandé ci-dessus, page 233, pour la simple réduction de notre figure 1re, et l'on y portera, au moyen du compas à verge, la distance des centres que nous venons de fixer à 8 lignes, de telle manière que le diamètre entier ou total du pignon ne sorte pas du haut de la ligne des centres, mais soit quelque peu dépassé par elle, comme d'environ une demi-ligne, ainsi qu'à l'article précédent de simple réduction, et l'on percera de suite sur ces deux points, deux très-petits trous de pivot.

1300. Le nombre de 6 ailes du pignon étant contenu 7 fois dans le nombre 42 des dents de la roue, et la distance des centres devant, suivant nos aphorismes, contenir autant de parties *plus une* que le nombre ou le rayon primitif du pignon est contenu de fois dans le nombre ou le rayon primitif de la roue, la distance des centres de 8 lignes devra être divisée en 8 parties, chacune d'une ligne : dont 7 parties formeront le rayon primitif de la roue, et la 8e partie (désignée par les mots *plus une*) formera le rayon primitif du pignon.

Le rayon primitif du pignon, se trouvant d'une ligne juste, sera porté et marqué sur la ligne des centres au moyen du compas à verge, tant au-dessus qu'au-dessous du centre précis du trou de pignon déjà percé, pour y pointer son diamètre primitif; et de suite, avec le petit compas à pignon ayant sa pointe conique placée au centre, on tracera très-légèrement, avec l'autre branche affûtée en ciseau et avec l'ouverture de 1 ligne, déjà pointée, le cercle primitif ou la circonférence primitive de ce pignon.

Ensuite, ayant marqué sur la ligne des centres, avec le compas à verge ouvert à 7 lignes juste, cette même distance, tant en haut qu'en dessous du centre précis du trou de la roue, on se servira du compas à calibre, dont le champignon sera placé à ce trou du centre de la roue, pour tracer de même le cercle primitif ou lacirconférence primitive de celle-ci. Cette dernière circonférence atteindra juste celle du pignon à leur point commun de contact sur la ligne des centres, où elles se confondent exactement ensemble, sans que l'une chevauche ni dépasse l'autre en ce point précis. Si pourtant il se trouvait quelque différence, il vaudrait mieux laisser quelque excès au diamètre de la roue que de la diminuer; mais il est facile d'opérer exactement en y employant le microscope, soit porté sur son pied, soit fixé naturellement à la tête ou à l'œil pour laisser les deux mains libres.

1301. Il convient ici d'observer qu'il faut éviter que les bords vifs du demi-cône de la pointe du compas à verge n'entaillent les bords des trous des centres, ce qui ferait glisser la pointe au delà du centre du trou; à cet effet, les 2 vives arêtes de ce demi-cône doivent être enlevées du côté de sa jonction avec l'autre, et, par précaution, on doit appuyer de préférence le dos du demi-cône contre le bord du trou qui est de ce côté, pour que sa coupe n'en mâche pas les bords. Il est bon aussi de s'assurer que les deux points

extrêmes des rayons primitifs n'en forment juste que le diamètre primitif ; pour cela on ouvre le compas à verge de tout le diamètre primitif du pignon, et l'on vérifie avec un microscope si les points tombent juste sur les deux points extrêmes de chaque rayon. De telles observations de détail seront superflues à l'égard des amateurs de la précision auxquels ces articles sont principalement adressés, mais ils peuvent être utiles aux élèves et à d'autres.

Jusqu'ici ces opérations ne sont qu'une sorte de répétition de celles recommandées pour la simple réduction des figures, mais le calcul va présider à presque tout le reste.

1302. Pour établir le diamètre total du pignon ou sa grosseur totale, il faut calculer l'épaisseur d'une de ses ailes : son rayon primitif étant d'une ligne, et par suite son diamètre primitif de 2 lignes, on peut en conclure la longueur de sa circonférence primitive, en se servant ici du rapport du diamètre à la circonférence : 1 à 3+1/7 (c'est-à-dire plus 1/7), comme plus simple et suffisant. Ainsi donc 2 lignes, diamètre du pignon, multipliées par 3+1/7, donnent 6 lignes + 2/7 (c'est-à-dire plus 2/7) de ligne pour la circonférence primitive du pignon, qu'il faut d'abord diviser en 6 flancs d'aile : c'est pour chaque espace entre deux flancs *menés* 1 ligne + 2/42, car le numérateur 2 de la fraction 2/7 ne pouvant être divisé directement par 6, il suffit, en place, de multiplier le dénominateur 7 par 6 pour obtenir le même résultat, et l'on aura 2/42. Ce sera donc 1 ligne + 2/42 ou + 1/21 même valeur, qu'on aura pour l'espace cherché entre un flanc *mené* d'une aile et le flanc mené de l'aile voisine. *La figure peut éviter ce calcul.*

1303. La plus forte épaisseur de l'aile du pignon de 6 étant au plus le tiers de l'espace ci-dessus, de 1 ligne + 2/42, qui peut être exprimé par la seule fraction 44/42, il faut donc en prendre le tiers. Mais le numérateur de cette fraction ne pouvant être divisé sans fraction par 3, il faudra, comme ci-dessus, en multiplier le dénominateur ; ainsi le tiers de 44/42 deviendra 44/126, ou, en moindres termes, 22/63 de ligne, même valeur : et comme, dans l'exécution, il est préférable pour le pignon que ses ailes soient plutôt plus minces que trop fortes, c'est-à-dire qu'il tienne plutôt du petit, pour les sûretés d'exécution connues, on ne prendra donc pour leur épaisseur que 21/63, différence 1/63 de ligne en moins et presque insensible. Or, la fraction 21/63 est réductible à 1/3, même valeur, et qui est son moindre terme. Donc l'épaisseur de l'aile du pignon de 6 sera 1/3 de ligne. On a vu précédemment que nous avons suivi pour règle d'ajouter au rayon primitif d'un pignon la moitié de l'épaisseur de son aile en la terminant en demi-cercle ; ainsi la moitié de 1/3 de ligne, qui est 1/6 de ligne, sera ajoutée au rayon primitif de 1 ligne de notre pignon, ce qui achèvera de former son rayon *total* de 1 ligne + 1/6. Enfin, le double de cette mesure, ou 2 lignes 1/3, sera la mesure de la grosseur totale ou du diamètre *total* du pignon.

Alors on ouvrira les pointes du compas à verge à 1 ligne 1/16, ou 1 ligne 2/12, même valeur, au moyen de celui des verniers qui peut diviser en 12es, et l'on en portera la mesure sur la ligne des centres du calibre pour y marquer, à partir du centre percé, et tant au-dessus qu'au-dessous, la longueur du rayon total du pignon. On vérifiera à

la loupe l'exactitude des deux points, par la mesure du diamètre *total*, 2 lignes 1/3, établie au compas à verge, et, avec le petit compas à pignon, on tracera légèrement, et suivant la précision requise pour la centration, le cercle total, ou circonférence totale du pignon, en dehors de sa circonférence primitive, mesure qu'il devra avoir tout fini et poli.

1304. Il reste à trouver aussi le diamètre total de la roue, mais nous n'aurons pas besoin d'en calculer et diviser la circonférence primitive comme ci-dessus; car, ayant arrêté qu'elle aura 42 dents, autant pleines que vides, ce sera l'affaire de la plate-forme et de la fraise qui la fendra et sera choisie en conséquence, ainsi que la lime à égalir. Du reste, la hauteur de l'excédant ogive de la roue ne dépend pas uniquement dè la grosseur de ses dents, mais aussi de l'étendue angulaire parcourue par l'aile du pignon suivant son nombre, et du point du flanc, où tombe une perpendiculaire à ce flanc, tirée du point commun de contact des cercles primitifs des deux mobiles à la ligne des centres. Nous trouvons, dans nos figures, que le point du flanc où la perpendiculaire susdite arrive à la fin de la menée est à 10/12, ou 5/6 même valeur, du rayon primitif du pignon, comptés à partir du centre. Ce point, déterminé par la fin de la menée, bornera donc le plus grand rayon total actif que la roue puisse avoir, sauf le peu que l'on voudra laisser en plus pour sûreté et conservation de la pointe d'ogive, l'ébat de rentrée étant plus que suffisant. On trouvera cette mesure dans la fig. 1 (de G E en *u*), où l'on verra que le cercle total de la roue pénètre sur la ligne des centres jusqu'à la moitié du rayon primitif du pignon; donc la hauteur de l'ogive des dents de la roue est la moitié de ce rayon primitif du pignon et a pour hauteur cette moitié, qui est de 1/2 ligne; ainsi le rayon total de la roue deviendra de 7 lignes 1/2, et le double de cette mesure, ou 15 lignes, sera le diamètre total ou la grandeur totale de ladite roue.

1305. La pénétration de l'engrenage dépend de la quantité dont les excédants se croisent, puisque les cercles primitifs sont en simple attouchement. Ici l'ogive de la roue excède son cercle primitif de 1/2 ligne ou 6/12 de ligne, même valeur, et l'arrondi du pignon excède son cercle primitif de 1/6 de ligne, égal à 2/12 même valeur, total 8/12 de ligne de pénétration. Or, le rayon primitif de la roue est de 7 lignes, et le rayon primitif du pignon est de 1 ligne, total 8 lignes, distance des centres. Mais le rayon total de la roue est 7 lignes + 6/12, et le rayon total du pignon 1 ligne + 2/12, total 8 lignes 8/12, qui dépassent la distance des centres de 8/12, ou 2/3 de ligne, et forment la quantité juste de pénétration que nous venons de trouver ci-dessus.

Nous avons déjà fait observer que, si dans le cours de l'exécution on trace sur le plat des dents de la roue sa circonférence primitive, et sur la face des ailes du pignon la circonférence primitive de celui-ci, la coïncidence exacte de ces deux cercles jugée au microscope déterminera la pénétration voulue de l'engrenage au moins aussi sûrement que le compas du même nom.

Calcul de l'engrenage du pignon de 7 par la méthode arithmétique.

1306. Suivant *Camus*, « une roue de 50 dents, ou de tant de dents qu'on voudra, ne « peut pas conduire uniformément un pignon de 7, en poussant ses ailes uniquement « après la ligne des centres. »

Le pignon de 7 ne peut donc être mené, comme on l'a déjà dit antérieurement, sans éprouver un frottement rentrant d'arc-boutement avant la ligne des centres. Cet inconvénient y est cependant un peu moindre qu'au pignon de 6. On a dit aussi, précédemment, que, lorsqu'on essaye de supprimer la menée avant le centre de tous ces pignons de bas nombre par la pénétration augmentée de l'engrenage, suivant la pratique trop commune et défectueuse, la force transmise devient inégale, et que la mesure moyenne de nos pignons tient un milieu bien préférable.

L'épaisseur de l'aile du pignon de 7 (déjà moindre que celle du pignon de 6) n'est ici que le tiers du rayon primitif de son pignon (la *corde* d'une aile n'est ici à la *corde* du vide que comme 7 est à 16, approximativement).

L'excédant de la roue, ou sa pénétration dans la circonférence primitive du pignon, est ici les 5/12 du rayon primitif dudit pignon. La roue est fendue autant plein que vide.

L'excédant du pignon, ou sa pénétration propre dans la circonférence primitive de la roue, est 1/6 du rayon primitif du pignon. C'est la moitié de l'épaisseur de l'aile, qui n'est elle-même que le tiers dudit rayon.

La roue proposée ici aura 52 dents menant le pignon de 7, au lieu de celui de 56 porté par la planche, qui ferait faire au pignon 8 tours juste, tandis qu'avec 52 dents le pignon fera 7 tours et 3/7 pour un tour de la roue. La distance entre les centres sera de 2 lignes et 19/20 : tous ces nombres sont ici fractionnaires.

1307. Ce changement du nombre des dents et ces quantités fractionnaires sont choisies ici de préférence pour exemple des rapports avec fractions, c'est-à-dire où les nombres des révolutions du pignon, pour une de la roue, ainsi que la distance entre les centres, ne sont pas exprimés en nombres entiers ou sans reste.

On voit ici que le nombre de 7 ailes du pignon dont il s'agit est contenu d'abord plus de 7 fois dans le nombre 52 des dents de la roue, et que, par conséquent, le rayon primitif du pignon doit l'être aussi plus de 7 fois dans le rayon primitif de la roue. On réduira donc cette quantité de fois en 7es, et l'on aura 1° 49/7 pour 7 fois 7/7, ou si l'on veut, pour 7 rayons primitifs du pignon, auxquels on ajoutera encore 3/7 de tour pour la fraction voulue, ce qui fera en tout 52/7, qui doivent composer le rayon primitif de la roue, lequel contiendra ainsi dans ces 52/7 7 fois et 3/7 le rayon primitif du pignon; 2° comme il faudra de plus un rayon primitif du pignon pour remplir la condition (*plus une*), ce sera encore 7 autres 7es à ajouter au bout du rayon primitif de la roue, pour compléter la distance des centres. Ce sera donc 59/7 du rayon du pignon qui occuperont la distance des centres, fixée ci-dessus à 2 lignes et 19/20.

La distance des centres devra être réduite en 20es de ligne (division que donne aisément le vernier décimal du compas à verge) ; on trouvera aussi 59/20 de ligne, en sorte que chaque 7e de rayon primitif du pignon sera de 1/20 de ligne.

Ainsi : le rayon primitif de la roue sera de 52/20 de ligne, ou de 2 lignes et 12/20, et le rayon primitif du pignon sera de 7/20 de ligne, et ces deux rayons primitifs, l'un au bout de l'autre, occuperont les 59/20 de ligne, ou les 2 lignes et 19/20 de distance entre les centres.

Pour avoir l'excédant de la roue, on prendra, comme il a été dit ci-dessus, les 5/12 du rayon primitif du pignon, qui est de 7/20 de ligne, et on aura 35/240 de ligne à ajouter au rayon primitif de la roue, qui est 2 lignes 12/20, pour former son rayon total. Les deux fractions 12/20 et 35/240, additionnées ensemble suivant la méthode pour les fractions, donneront 179/240 à joindre à 2 lignes ; on aura donc pour rayon *total* de la roue 2 lignes et 179/240.

Et le double de cette mesure, ou 5 lignes et 59/120, sera le diamètre total ou la grandeur totale de la roue. Cette dernière fraction, non réductible, n'est inférieure à une demi-ligne que de 1/120 de ligne. Et, comme la roue doit toujours, pour sûreté de sa menée, tenir plutôt du grand, sa grandeur entière ou son diamètre total sera comptée à 5 lignes 1/2.

L'excédant du pignon est toujours la moitié de l'épaisseur de son aile, et cette épaisseur étant pour le pignon de 7 le tiers de son rayon primitif, ou le tiers de 7/20 de ligne, cette même épaisseur d'aile sera 7/60 de ligne, dont la moitié 7/120 sera l'excédant ou arrondi du pignon à ajouter à son rayon primitif. Ainsi 7/120 excédant l'aile, additionnés avec 7/20 rayon primitif du pignon, donneront, par l'usage d'opérer sur les fractions, 49/120 pour rayon *total* du pignon.

Et le double de cette dernière mesure, ou 49/60, sera le diamètre total, ou la grosseur totale du pignon.

En additionnant le rayon *total* de la roue trouvé plus haut de 2 lignes et 179/240 avec le rayon *total* du pignon, trouvé aussi de 49/120 ou de 98/240 même valeur, on aura, par ces fractions seules additionnées, 277/240, ou 1 ligne et 37/240 à ajouter à 2 lignes, c'est-à-dire 3 lignes et 37/240, produit des deux rayons pris au total, et comme il n'y a que 2 lignes et 19/20 de distance entre les centres, en ramenant les fractions au même dénominateur, on trouvera dans le total des deux rayons un excès de 49/240 de ligne, sur la distance des centres. Ce sera la quantité de pénétration des dentures dans l'engrenage.

En effet, en additionnant à part l'excédant de la roue, trouvé de 35/240, avec l'excédant du pignon trouvé de 7/120, et après les avoir réduits au même dénominateur et ramené leur produit à ses moindres termes, on aura 49/240 de ligne, quantité égale à celle de la pénétration trouvée ci-dessus, ce qui confirmera, sous ce rapport, l'exactitude de l'opération. Cette fraction 49/240 de ligne, non réductible, équivaut à environ 1/5 de ligne, plus fort que le vrai d'environ 1/240 de ligne. Ainsi, un fort 5e de ligne sera la quantité de pénétration d'engrenage de ces petits mobiles.

1308. Pour ne pas allonger cet article de tous les détails des opérations sur les fractions, que le lecteur doit connaître d'avance, on s'est borné à en indiquer la marche principale et les résultats, ce qui doit suffire. Mais il importe en général d'éviter autant que possible dans les données, c'est-à-dire dans les premières mesures ou rapports donnés d'un engrenage des quantités fractionnaires trop minimes, c'est-à-dire trop chargées de chiffres, ce qui, en allongeant l'opération, laisse d'autant plus de chances d'erreurs de chiffres. On le pourra presque toujours, car il importe rarement que les mobiles d'un calibre restent absolument de la grandeur tracée dans l'ensemble du calibre, on a presque toujours la latitude de faire les roues plus grandes ou plus petites d'environ 1/2 quart de ligne, plus ou moins, suivant le cas, sans nuire au mécanisme, et tout bon calibre doit être établi avec cette latitude par des jours suffisants ménagés entre les pièces, pour pouvoir planter les mobiles plus loin ou plus près les uns des autres d'une légère quantité, quand on fixe en définitive leur grandeur d'après les nombres : celle-là seule reste absolument essentielle et ne souffre pas d'à-peu-près. La latitude dont nous parlons est surtout nécessaire pour la confection des pignons; on sait que les effets de la trempe, de l'adouci et du poli ne leur laissent pas aisément la grosseur exacte demandée, et que même, pour ce motif, on ne doit exécuter les roues que sur la grosseur des pignons entièrement finis: alors on en mesure la grosseur totale, telle que le travail soigné et le plus rapproché la produit, et l'on en conclut, par le moyen déjà dit (art. 1264, et ailleurs), les diamètres et rayons primitifs restant aux pignons, qui seuls déterminent ensuite la dimension précise des roues.

1309. Il est aussi bon d'éviter, dans la composition d'un calibre, les pignons d'un nombre impair, dont la mesure ne peut être prise aussi directement, comme on l'a observé (1265), que celle des nombres pairs, car du reste il n'y a pas d'autres préventions à avoir contre ces nombres, comme le croient quelques personnes qui s'attachent superstitieusement aux nombres *rentrants*. Il peut y avoir de bonnes raisons pour employer les uns ou les autres, pourvu que l'on y conserve l'exactitude voulue des rapports.

1310. Il convient de saisir l'*à-propos* si l'on avait pris ici 3 lignes juste pour la distance des centres, on aurait pu croire la question simplifiée, et elle se serait trouvée plus compliquée, sans utilité, car la différence d'un 20e de ligne et même de plus, sera sans effet dans les dimensions générales d'un rouage, comme on vient de l'observer. 2 lignes 19/20 se trouvaient préférables ici, parce que leur division s'accorde plus simplement avec le nombre de 7mes du rayon primitif à prendre dans la distance des centres. L'exactitude importante est celle du rapport entre les rayons primitifs des mobiles, qui doit être pareil au rapport établi entre leurs nombres dans chaque engrenage; c'est là l'essentiel, comme nous l'avons dit si fréquemment.

Calcul pour le pignon de 8 mené par une roue de 60 dents.

1311. La fig. 3, pl. XXXIII, représente le pignon de 8 mené par une roue de 64 dents; mais nous changeons ce nombre en celui de 60 que nous employons ici, parce que la roue de 64 dents de la figure produit 8 révolutions juste du pignon de 8 qu'elle conduit, tandis que la roue de 60 calculée ne produira que 7 révolutions et 1/2 du même pignon, ce qui présentera un rapport fractionnaire; mais il ne résulte pas toujours de ce dernier rapport fractionnaire que le calcul en soit plus chargé de fractions, ainsi qu'on vient de le dire plus haut et qu'on va le voir ci-après.

Si l'on se propose donc l'emploi d'une roue de 60 dents menant un pignon de 8 ailes, une révolution de cette roue produira 7 tours et 1/2 du pignon et le rayon primitif de cette roue devra contenir 7 fois et 1/2 le rayon primitif de ce pignon, ou ses 15 *demi-rayons* primitifs; il faudra en outre un autre rayon primitif ou deux *demi-rayons* primitifs du même pignon, à la suite de celui primitif de la roue, pour remplir la distance entière des centres, composé comme on l'a toujours vu (suivant la règle *plus une* fois). La distance des centres se trouvera donc ici contenir 17 *demi-rayons* primitifs du pignon, valeur égale à 8 rayons et 1/2. Mais nous allons compter ici par *demi-rayons*, pour avoir, dans le calcul, des unités de même espèce.

Pour le même motif, nous supposerons ici la distance donnée des centres, de 3 lignes et 2/5es, et nous la réduirons toute en 5es, l'on aura ainsi 17/5es à répartir à 17 demi-rayons, à raison de 1/5e de ligne pour chaque demi-rayon (ou de 2/5es de ligne pour chaque rayon primitif du pignon). C'est ainsi que la distance entre les centres de 3 lignes et 2/5es contiendra : 1° 15/5es de ligne pour les 7 et 1/2 rayons primitifs de pignon, lesquels forment celui primitif de la roue, et 2° deux autres 5es de plus pour le propre rayon primitif du pignon ajouté à la suite de celui primitif de la roue, pour occuper entièrement la distance des centres.

Nous aurons donc pour premières bases de notre calcul le rayon primitif de la roue de 15/5es de ligne, et le rayon primitif du pignon de 2/5es de ligne, total 17/5es occupant la distance voulue de 3 lignes et 2/5es entre les centres.

L'excédant de la roue étant avec le pignon de 8, suivant une règle que l'on trouvera plus loin (art. 1318 et 20), les 4/11es au moins du rayon primitif du pignon que nous avons vu être de 2/5es de ligne, cet excédant se trouvera être 8/55es de ligne, à ajouter au rayon primitif de la roue, lequel est de 3 lignes, et l'on aura 3 lignes et 8/55es pour rayon *total* de cette roue, cette fraction équivaut à très-près de 1/7e de ligne.

Et le double de cette mesure, ou 6 lignes et 16/55e, sera le diamètre total, ou la grandeur totale de la roue.

L'excédant du pignon étant invariablement la moitié de l'épaisseur de son aile, laquelle est pour le pignon de 8 les 2/7es de son rayon primitif, c'est-à-dire ici les 2/7es de 2/5es de ligne, on aura 4/35es de ligne pour l'épaisseur entière, dont la moitié, 2/35es, sera ajoutée comme excédant au rayon primitif du pignon de 2/5es, et l'on aura, par

l'addition des deux fractions, réduite à ses moindres termes, 16/35es de ligne pour rayon *total* du pignon, ou très-peu moins de demi-ligne.

Et le double de cette mesure, ou 32/35es de ligne, sera le diamètre *total*, ou la grosseur *totale* de ce pignon (de 1 ligne, moins 3/35es).

En additionnant le rayon total de la roue, de 3 lignes et 8/55es avec le rayon total du pignon de 16/35es, on aura 3 lignes + 232/385es de ligne. Or, la distance n'étant que de 3 lignes et 2/5es, on réduira la fraction des rayons au même dénominateur que la fraction de la distance des centres, et l'on trouvera 3 lignes + 154/385es à soustraire de 3 lignes + 232/385es provenant des deux rayons pris au *total;* il restera un excès de 78/385es pour pénétration de l'engrenage.

Pour vérifier cette pénétration, qui se compose toujours des deux excédants des mobiles, mis l'un au bout de l'autre, on additionnera à part les deux excédants, 8/55es de la roue et 2/35es du pignon, et l'on trouvera leur somme de 78/385es égale à celle attribuée ci-dessus à la pénétration, d'où il suivra que le calcul est exact.

Cette fraction 78/385es équivaut à très-près de 1/5 de ligne, et cette petite quantité de pénétration est proportionnée au peu de dimension des deux mobiles. La distance de leurs centres étant rigoureusement observée dans le plantage, avec les conditions requises de sûreté, l'engrenage sera aussi parfait qu'il peut l'être.

Nous bornerons ici ces exemples du calcul arithmétique des proportions des mobiles comme de leurs dents et de leurs ailes, ces trois applications pouvant suffire pour tous les autres cas, plus faciles à calculer qu'à imprimer sans erreurs de chiffres.

1312. Quant au pignon de 9 peu usité, et au pignon de 10 si susceptible de mener trop aisément avant le centre, ou d'éprouver des accotements dans les rentrées, si, pour éviter le premier inconvénient, on tombe dans celui de laisser à ce dernier trop peu d'ébat ou de tenir ses ailes trop maigres, on se réglera d'après les fig. 1 et 2 de la pl. XXXIV, et autres suivantes pour des pignons plus nombrés ; nous en référons là-dessus à ce que nous avons déjà dit sur la réduction pointillée de la denture et des ailes de l'engrenage du pignon de 10 (articles 1266 et 1267). Ces remarques et d'autres sont d'ailleurs appuyées du sentiment de *Camus*, dont nous allons rapporter quelques principaux articles sur ce sujet.

« Un pignon de 10 aîles, dit ce savant géomètre, pourra être conduit uniformément « par une roue de 72 dents qui poussera les flancs de ses aîles uniquement après la ligne « des centres, pourvu qu'on fasse ce pignon un peu plus vide que plein. » (Nous disons, nous, pour l'exécution éprouvée en petit et à cause de l'imperfection des outils : *beaucoup plus vide que plein*). Le même auteur, ayant traité assez amplement la question générale, ajoute vers la fin ce qui suit :

« Dans toutes les roues dont on vient d'examiner l'engrenage avec les pignons de 7, 8, « 9 et 10 aîles, la droite menée du centre de la roue au point où la dent abandonne l'aîle « du pignon, divise la dent de la roue en deux parties égales et semblables. Ainsi les « dents de ces roues sont pointues; mais on ne peut pas faire autrement dans ces rouages,

« lorsqu'on veut que le pignon soit mené uniformément, et que ses aîles soient poussées « uniquement après la la ligne des centres (*si la menée atteint la pointe*).

« Si le pignon avoit un plus grand nombre d'aîles comme 11 ou 12, on pourroit « tracer d'abord la dent un peu plus longue qu'il n'est nécessaire pour conduire l'aîle « au delà de la ligne des centres jusqu'à ce que le flanc de l'aîle suivante *fût* arrivé dans « cette ligne ; ensuite on pourroit rogner la dent de toute la quantité qui excéderoit la « longueur qui lui est nécessaire pour conduire le pignon comme on vient de dire, « ou bien on pourroit terminer cette dent par un arc de cercle qui toucheroit les deux « épicycloïdes de la dent, comme on va l'expliquer pour les dents des roues qui doivent « conduire les pignons en poussant leurs aîles en partie avant et en partie après la ligne « des centres. *On trouvera un peu plus loin les règles de* Camus, *mais abrégées.*

« Lorsque les aîles du pignon peuvent être poussées uniquement après la ligne des « centres, on doit remarquer que ses aîles n'ont pas besoin d'être prolongées au delà de « sa circonférence primitive, et que le diamètre *vrai* (total) peut être égal au primitif. « Mais, comme les angles qui termineroient les flancs des aîles pourroient gratter les « dents des roues et causer des arrêts dans la machine, on est obligé de tenir le diamètre « vrai (total) du pignon plus grand que son diamètre primitif, d'une quantité à peu près « égale à l'épaisseur des aîles, et l'on arrondit les extrémités des ailes en demi-cylindre, « afin que, si quelque dent venoit à prendre une aîle avant la ligne des centres, « elle pût glisser sur l'arrondissement de cette aîle. » (*L'on a vu que nos pignons sont ainsi tracés.*)

1313. Le même auteur recommande ailleurs d'émousser légèrement toutes les dents des roues (leurs pointes), etc., et l'on peut voir par ces extraits que notre méthode est généralement d'accord, à quelques parenthèses près, avec les principes de sa théorie, qui peut être considérés comme le type de toutes les idées saines sur cette matière. L'auteur ajoute encore plus loin : « Quoique les règles que l'on vient d'exposer pour former les « dents des roues ne puissent être mises en pratique que dans le cas où les dents seront « de la même grosseur ou plus grosses que celles qu'on a dessinées dans les figures de « ce livre, elles ne seront point inutiles aux artistes qui auront des dentures beaucoup « plus fines à former ; parce que, lorsqu'ils auront devant les yeux la figure d'une grosse « dent semblable à celles qu'ils doivent faire en petit, il leur sera aisé de l'imiter à la « vue simple. »

« Comme on ne peut pas espérer de former les dentures avec toute l'égalité et la pré- « cision qui sont nécessaires pour que les *circonfér. prim.* de la roue et du pignon « tournent toujours avec la même force et vitesse ; que l'inégalité et les autres défauts de « la denture seroient cause que quelques dents ne conduiroient point aussi loin qu'il le « faudroit après la ligne des centres les aîles qu'elles doivent pousser, et qu'il en pour- « roit résulter des arcboutements des aîles (suivantes) contre les dents qui (en commen- « çant leur menée) prendroient ces aîles trop tôt avant la ligne des centres, les artistes « préviennent cet inconvénient en faisant le diamètre primitif de la roue un peu plus « grand qu'il ne doit être, relativement à celui du pignon.

« Au moyen de cet agrandissement du diamètre de la roue, qui doit être proportionné « aux défauts que l'on peut craindre dans la denture, la dent qui suit celle qui pousse « l'aile après la ligne des centres prend un peu plus tard l'aile qui suit ; et, lorsque « la dent précédente a poussé l'aile après la ligne des centres aussi loin qu'elle le peut « faire uniformément, la roue prend un peu plus de vîtesse qu'elle n'en communique au « pignon, ce qui est un défaut ; mais ce défaut, dans lequel on tombe volontairement, « est moins à craindre que les arcboutements auxquels on seroit exposé si on vouloit l'é- « viter. (Avec peu d'augmentation ce défaut devient insensible.)

« Il est évident que ce qu'on vient de dire, au sujet de l'agrandissement du diamètre « de la roue au-delà de ce qui est nécessaire pour conduire uniformément le pignon, « suppose que ce sera la roue qui le conduira ; mais, lorsque la roue sera conduite par « un pignon, il est clair que pour éviter les arcboutements ce sera le diamètre primitif « du pignon qu'il faudra rendre un peu plus grand qu'il ne faut pour conduire la roue « uniformément, etc. »

1314. Les proportions de l'engren. avec le pignon de 10 ont donc besoin d'être un peu modifiées, comme pour les pignons précédents ; mais avec ceux de nombres plus élevés on doit suivre les mesures de la théorie sans aucune modification ; cependant le nombre des ailes ne doit pas être augmenté avec excès, surtout aux derniers mobiles ; il ne faut pas que les pignons soient nombrés au point que la denture en devienne trop petite pour une facile exécution. Nous avons dit ailleurs que les moyens termes sont presque toujours préférables. Les pignons de 12 à 16, distribués convenablement aux divers mobiles, peuvent très-avantageusement remplir le but.

Toutes ces observations sont applicables suivant les cas aux divers engrenages, avec l'avis général de *Camus*, que le pignon mené tienne plutôt du petit dans l'exécution, mais non pas à beaucoup près au degré habituel des fabriques, ou que, le pignon étant mesuré tout fini, la roue menante tienne plutôt quelque peu du grand, sauf à la réduire peu à peu, comme il est si facile, en terminant l'engrenage et en conservant un avantage de sûreté ; c'est ce que nous avons déjà fait observer plus d'une fois.

1315. La meilleure manière de juger des effets de la menée est de faire marcher les mobiles lentement, en considérant avec un fort microscope la courbe de la dent et le flanc de l'aile, de profil et contre le jour ; si la disposition des platines permet d'y percer des jours, il y faudrait deux ouvertures correspondantes ; mais souvent on ne peut en avoir qu'une, ou ne voir l'engrenage qu'au bord d'un pont : il faut alors disposer le tout de manière que la platine rende le fond lumineux, tandis que l'engrenage sera dans l'ombre, et l'éclairage à la lampe pourra faciliter l'opération. On gêne mollement et légèrement, par les moyens connus, les mobiles qui sont alors en place, à la suite de celui qu'on éprouve, et l'on distingue avec le microscope le point noir de contact de la courbe de la dent sur le flanc du pignon. On voit d'abord ce point noir s'établir avant la ligne des centres pour les pignons de bas nombre (ou sur la ligne des centres avec les pignons au-dessus de 10) et se déplacer peu à peu sur le flanc de l'aile, en se rapprochant du centre du pignon, à mesure qu'il se meut ; arriver enfin près de l'extrémité

de l'ogive, et se terminer au moment où finit la menée, sans atteindre tout à fait la dernière pointe de la dent; le point noir disparaît à l'instant où la dent et l'aile suivantes entrent en contact. C'est quelque peu au delà de la disparition du point noir que l'on est libre de retrancher le superflu de la dent; mais, quand on peut conserver la pointe, le goût général en horlogerie est de lui laisser sa figure entière; tandis que dans les grosses machines on ne conserve que la partie de courbe en action; et alors, si les pignons y sont très-nombrés, ou si deux roues de haut nombre engrènent ensemble, il y a si peu de courbe employée, que la partie retranchée après la menée laisse ces dents presque carrées, forme peu agréable à l'œil et qui semble dissimuler son principe. La précaution d'enlever sur le tour la vive pointe de la dent doit peu s'apercevoir, le but principal n'étant que d'éviter en ce point un tranchant sujet à se rebrousser au moindre choc. On ne fait mention ici de ces détails particuliers et autres que pour atteindre le mieux suivant l'importance du sujet : quand on sait faire le mieux, on peut négliger ce que certains ouvrages ne méritent pas; mais ce qu'on ne doit négliger en aucun cas, ce sont les proportions et les rapports des grandeurs *primitives* avec les nombres.

1316. Les pignons de 12 à 16 ailes ne sont pas si exigeants et laissent plus d'ébat ou de jour dans les rentrées, en conservant leurs ailes fortes et les dentures de leurs roues fendues autant plein que vide. Dans les occasions où l'on emploie beaucoup de puissance, il est avantageux d'arrondir le fond des ailes et des dentures, comme il est indiqué dans la fig. 3, pl. XXXIV, au pignon de 11, mené par une denture de barillet, et dans la fig. 4 au-dessous, à la roue menée par un pignon de 8. L'arrondi du fond des dentures prévient, dans le cas de grand effort, la rupture des dents et des ailes; car il est admis proverbialement que *tout angle rentrant est* par lui-même à cet égard un *commencement de rupture*.

1317. Les calculateurs, ordinaires qui savent nécessairement traiter les fractions, feront aisément et même assez rapidement l'application de la méthode aux pignons de hauts nombres, et aussi aisément qu'à ceux de 6, 7 et 8, dont nous avons offert les exemples. Nous avons donné la méthode de facile réduction comme plus expéditive pour les ateliers, et d'autant plus simple qu'en principe le pignon de même nombre conserve sa forme, sauf sa dimension relative, et que les roues de nombres différents des modèles cités n'éprouvent aucun changement dans la distance de leurs dents à leur circonférence primitive, et infiniment peu dans leurs ogives, lors même que l'on doublerait le nombre des dents, *pourvu que* l'on observe la condition de la distance des centres avec les rapports des rayons primitifs et des nombres; mais si l'on avait à tripler et quadrupler les nombres des dents cotés sur nos figures, avec le même pignon, il deviendrait nécessaire d'en tracer en grand l'engrenage pour en régler plus exactement la proportion d'ogive, suivant la recommandation de M. Lalande; et, en adoptant son opinion, nous espérons avoir assez fourni les moyens de l'exécuter.

Remarque sur la hauteur de l'excédant des roues.

1318. On a dit que la hauteur des excéd. ou ogives des roues dépend presque entière-

ment du nombre d'ailes du pignon mené, et de l'ouverture de son angle particulier de révolution pour l'arc parcouru par le flanc pendant chaque menée, la quantité de degrés y étant fixe pour chaque nombre d'ailes, quelle que soit la dimension du pignon. La largeur des dents de la roue peut bien influer aussi sur leur hauteur totale, lorsque le plein n'est pas égal au vide; mais, quand les dents ont autant de vide que de plein, la hauteur de l'excédant de la roue est uniquement fixée par le nombre du pignon mené.

On a déjà vu que l'excédant ou ogive de la roue qui mène le pignon de 6 a pour hauteur 6/12es, ou la moitié du rayon de ce pignon, ajoutée à chaque dent au delà de sa circonférence primitive et au milieu des deux flancs droits de sa dent.

L'ogive de la roue qui mène le pignon de 7 a pour hauteur 5/12es du rayon primitif de ce pignon, appliqués comme ci-dessus.

Pour le pignon de 8, l'ogive de la roue qui le mène a sa hauteur entre 3/8es et 4/11es du rayon primitif de ce pignon.

Pour le pignon de 9, la hauteur de l'ogive de la roue menante est les 2/5es du rayon primitif du pignon.

1319. Quant au pignon de 10, comme la denture de sa roue est plus pleine que vide, la hauteur de l'excédant de celle-ci s'écarte de la progression des autres et varie entre les 4/10es et les 4/14es du rayon primitif de ce pignon, suivant que ses ailes sont tenues plus faibles et les dents de la roue plus larges. Nous avons déjà remarqué que ces ailes de 10, diminuées de force, ne conviennent pas aux premiers mobiles éprouvant une forte pression; et que, du reste, les accotements sont à craindre dans l'extrême précision que ce pignon exige. Il y a sous ces rapports tout à gagner avec le pignon de 12, que l'on trouve généralement employé au centre, dans toute la bonne horlogerie ancienne.

Au pignon de 11 ailes, l'excédant de la roue qui le mène est 1/3 du rayon primitif de ce pignon, ou près de 8/27e à la pointe de l'ogive (1).

Au pignon de 12, la hauteur d'ogive de la roue qui mène est les 4/13es du rayon primitif du pignon mené.

De l'arc de menée de l'aile d'un pignon suivant son nombre d'ailes, d'où résulte la règle ci-dessus pour la hauteur de l'excédant des roues qui mènent

1320. A l'article 5 de nos aphorismes, page 238, nous avons promis le développement des principes ci-dessus et suivants, qui règlent la hauteur de l'excédant des roues. On a déjà fait remarquer que l'étendue de l'arc de menée d'une aile de pignon dépend du nombre des ailes, et que, pour le pignon de 6, cet arc est de 60° du cercle; pour celui

(1) A l'égard de la fig. 3, pl. XXXIV, du pignon de onze ailes, nous remarquerons que le centre du cercle qui ébauche la *courbe* de l'ogive de sa roue, cercle pointillé à la droite de la figure pour les deux côtés d'ogive, est mal *centré* par erreur au milieu d'une dent, car la courbe y serait trop aplatie. Le rayon de cette portion de cercle doit être raccourci, et avoir son *centre* sur le flanc le plus voisin de cette dent vers les 3/5 de sa hauteur, à commencer du pied, et à droite et à gauche, puisqu'il faut ici autant de centres de cercle que de côtés d'ogive, ce qui n'empêche pas la modification ordinaire toujours recommandée : de faire accorder chaque courbe à l'approche de son flanc avec lequel elle ne doit point *jarreter*.

de 7, de 51° 3/7"; pour celui de 8, de 45°; pour celui de 9, de 40°; pour celui de 10, de 36°; pour celui de 11, 32° 8/11"; pour celui de 12, 30°; et ainsi de suite pour les pignons de plus haut nombre; le cercle entier de 360°, divisé par le nombre d'ailes du pignon, déterminant ainsi, par son quotient, le nombre de degrés de l'arc parcouru par la menée de chaque aile, suivant le nombre d'ailes de chaque pignon. Nous allons maintenant fixer la hauteur de l'excédant d'une dent de roue sur la fig. 2°, pl. XXXVI, qui représente un pignon de 7 ailes, mené par une roue plate, d'après Camus, et suivant la proportion théorique de forte menée en arc-boutant en *b*, avant la ligne des centres, applicable aux rouages avec échappement à recul. Du reste, cette explication se rapporte à proportion à toutes nos figures d'engrenage.

1321. Lors donc que le flanc d'une aile a parcouru son arc de menée et que celle-ci cesse à la reprise de l'aile suivante par une autre dent de la roue, si, en cette position du flanc, on y cherche le point *r* de nos fig. (et pl. XXXVI, fig. 2), d'où une perpendiculaire *rb* au même flanc peut passer par le point de contact *b* des deux circonférences primitives de la roue et du pignon sur la ligne des centres, ce point *r* du flanc sera celui où la courbe régulière de la dent de roue terminera sa menée, et par conséquent celui où arrivera la fin de la partie menante de l'ogive; une ligne droite *r s* F tirée de ce point au centre de la roue, aura la longueur juste du plus long rayon *total* que la roue puisse avoir pour mener uniformément; et, comme la première partie de cette droite descend du point *r* du flanc perpendiculairement en *s* sur la circonférence primitive de la roue, la distance *r s* sera en effet la hauteur nécessaire de l'excédant ou ogive de chaque dent de cette roue; et c'est ainsi que la hauteur de l'excédant ou ogive d'une roue dépend en principe du nombre des ailes du pignon qu'elle mène; cette règle, suite des articles précédents, est exacte et indépendante de la largeur des dents de la roue.

1322. Pour trouver graphiquement la perpendiculaire au flanc *r f* du pignon, indiquée ci-dessus, on sait déjà faire glisser l'un des bras d'une équerre au long du flanc dans la situation de celui-ci, saisie à la fin de sa menée, jusqu'à ce que l'autre bras de l'équerre passe juste sur le point de contact *b* à la ligne des centres; c'est alors que l'angle *r* de l'équerre indique sur le flanc le point *r* où tombe la perpendiculaire voulue : ce point du flanc sera ainsi à la fois celui où cesse le contact de la dent sur l'aile du pignon, celui où finira la menée de l'aile, et enfin celui de la hauteur nécessaire de l'excédant ou ogive des dents de la roue, au delà ou en dehors de sa circonférence primitive; on l'a déjà vu, mais on va appliquer ici la règle au rayon de la roue.

Cette perpendiculaire au flanc, passant au point de contact *b* des deux circonférences primitives de la roue et du pignon sur la ligne des centres, aura encore une autre propriété importante, si on la prolonge en ligne droite, en R, au delà du point de contact; car elle donnera aussi, à chaque point de la menée du pignon, la longueur du rayon *virtuel* (efficient) G R par lequel la roue agit en principe sur le rayon correspondant *r*, ou, en d'autres termes, la longueur *effective* des deux leviers que les rayons G R et *r f* représentent pendant toute la menée.

Car, ayant prolongé indéfiniment, au delà du point de contact des circonférences, la

ligne *r b* perpendiculaire au flanc de l'aile (fig. 2, pl. XXXVI), si l'on fait de même glisser un bras d'équerre sur la prolongation de cette ligne *b* R, jusqu'à ce que l'autre bras passe sur le centre G de la roue, le point R, indiqué par l'angle de l'équerre et d'où cette autre perpendiculaire passe par le centre de la roue, donnera, par la distance de ce point R au centre de cette roue, la vraie longueur du levier *virtuel* par lequel la roue agit sur le levier ou rayon du pignon. Ainsi, dans toutes les situations de l'aile du pignon, la ligne (*r b* R) prolongée étant perpendiculaire à la fois aux deux leviers *virtuels* du pignon et de la roue, transmettra la force ou puissance de la roue au pignon exactement dans les mêmes rapports qui ont lieu lorsque la menée commence sur la ligne des centres. En effet, au premier point de contact de la menée sur la ligne des centres, la communication des deux leviers de la roue et du pignon est immédiate, et, s'il pouvait y avoir une ligne infiniment petite de séparation, cette ligne serait horizontale et perpendiculaire à la ligne des centres; mais, à mesure que le flanc du pignon est mené au delà de la ligne des centres, *r b* R perpendiculaire à *r f* devient oblique à cette ligne des centres, et de plus en plus, tout en conservant constamment sa perpendicularité à l'égard des deux rayons *virtuels* de la roue et du pignon, ainsi que leur même proportion de longueur relative exigée pour une menée uniforme; en sorte que les deux rayons *virtuels* du pignon et de la roue, s'écartant et se raccourcissant toujours à la fois de quantités proportionnelles, conservent entre eux le même *rapport* de longueur qu'ils avaient sur la ligne des centres : d'où il résulte que la puissance de la roue sur le pignon reste uniformément la même pendant toute la durée de la menée, si toutefois la courbe de l'excédant maintient le point de contact de l'ogive à des hauteurs proportionnelles au mouvement du rayon ou flanc du pignon, ainsi qu'il est démontré que l'épicycloïde est en possession de le produire.

1323. La fig. 2 de la pl. XXXVI indique sommairement ces effets. La ligne *a b* B étant celle des centres, la perpendiculaire au flanc du pignon à la fin de sa menée est la ligne *r b* prolongée indéfiniment vers R. Le rayon *virtuel* de la roue est alors celui pointillé en GR, et l'on voit que si, sur la ligne des centres, le rayon primitif G *b* de la roue contient un nombre de fois quelconque celui primitif *b f* du pignon, suivant le rapport des nombres de la roue et du pignon, le rayon *virtuel* pointillé G R de la roue, agissant sur le rayon du pignon par la droite R *b r* perpendiculaire à la fois aux deux rayons, contient aussi autant de fois le rayon d'action du pignon, qui se mesure de *r* en *f*. En sorte que, dans quelque situation de l'arc de menée que puisse se trouver le flanc du pignon, l'obliquité résultante de sa perpendiculaire, à l'égard de la ligne des centres, fera reculer à proportion la situation du rayon *virtuel* de la roue, afin qu'il se trouve également perpendiculaire à la ligne de communication R *b r*; alors les deux rayons, celui *virtuel* de la roue et celui d'action du pignon, conserveront constamment entre eux les mêmes rapports primitifs de longueur que sur la ligne des centres. Les bornes de cet ouvrage ne nous permettent pas de développer davantage ce principe complétement reconnu par la théorie, mais un peu d'examen suffira pour le faire concevoir.

La théorie trouve la hauteur de l'excédant par un calcul trigonométrique, mais nous n'avons voulu employer ici que des procédés graphiques plus accessibles à tous les lecteurs:

1324. Nous n'entrons dans d'aussi grands détails que pour réfuter ceux qui prétendent qu'il y a de l'arbitraire dans les proportions des engrenages, tandis que tout y est au contraire fixé et démontré par la théorie, dont l'application doit être aussi fidèle que les moyens de l'art et la nature de la matière le permettent. On trouvera des démonstrations dans Thioût, Lepaute, Berthoud, Camus, et autres auteurs, qui satisferont ceux qui peuvent les suivre, mais on n'y trouvera pas de méthode régulière d'application pour les ateliers et pour les praticiens, ni pour les amateurs de l'art; nous n'en avons trouvé nulle part, et c'est ce qui nous a engagé à produire celle que nous nous sommes faite, dont nous avons éprouvé et vérifié maintes fois le succès et la convenance. Nous l'offrons comme un moyen pratique fondé sur la théorie, et auquel, du reste, il fallait toujours arriver pour une application raisonnée.

1325. On ne taxera pas non plus d'arbitraire la modification que nous admettons pour les engrenages avec des pignons de bas nombre; la règle théorique ancienne n'ayant été admise que pour des rouages avec échappement à recul, nous conservons celle-ci comme essentielle dans ce cas, surtout pour les engrenages de champ, que nous allons traiter à la suite de ces articles. Mais l'usage moderne des échappements à repos, si répandu, a nécessité cette nouvelle mesure pour conserver l'uniformité et prévenir l'inertie dans des rouages dont la progression est devenue *intermittente* par les repos de l'échappement. La différence introduite ici est en outre fondée sur l'insuffisance, dans la pratique, des proportions mêmes de la théorie, qui a négligé le *frottement*. Elle a donné le principe nu, en laissant à la pratique le soin de le modifier; comme il arrive presque toujours à la théorie, qui a besoin d'être assujettie avec intelligence à l'expérience et aux difficultés du travail comme de la matière : il serait facile d'en citer nombre d'exemples. Ici la théorie ayant négligé dans l'engrenage la question du *frottement*, qui augmente sensiblement vers la fin de la menée, nous en avons tenu compte dans la pratique de notre modification pour rétablir l'équilibre de puissance entre le commencement et la fin de la menée. On en trouvera la preuve dans l'exécution, si l'on se conforme exactement aux attentions recommandées et disséminées dans ces articles d'engrenage, ainsi qu'à l'imitation exacte des modèles de nos planches; l'examen attentif des figures suffira même pour en faire pressentir le succès.

1326. On y voit aussi, par exemple, que les flancs des vides entre chaque dent des roues convergent vers le centre, tandis que les fraises établissent ces flancs parallèles. Mais on réfléchira aisément que de telles différences dans l'exécution deviennent insensibles, puisque les flancs de la roue n'agissent que sur une partie imperceptible de l'arrondi des ailes dans les pignons de bas nombre, et n'agissent point du tout sur ceux de haut nombre, dont l'arrondi ne fonctionne pas. D'ailleurs, si l'on fend les dents au burin, rien n'empêche de former celui-ci de manière à rendre les flancs de la denture droits au centre de leur roue, comme aussi d'établir des fraises d'une forme analogue, comme on le fait pour les pignons, aujourd'hui divisés presque tous par un outil à plate-forme. Ces différences sont légères et insensibles au commencement de la menée; mais c'est la fin de cette menée qu'il importe le plus de soigner; et même aux pignons de bas nombre, le parallélisme des

flancs des dents est un avantage pour faciliter la menée avant le centre, puisque l'arc-boutement en devient d'autant moindre. Il y a une foule d'autres petites observations de détail dont nous nous abstiendrons pour ne pas allonger ces articles, et que les esprits intelligents remarqueront facilement d'eux-mêmes. Quant à ceux que ces détails, ces explications et la difficulté des calculs peuvent en détourner, ils auront toujours la ressource aisée de se borner à la simple réduction de nos figures ; moyen qui leur procurera de lui-même l'avantage d'établir au premier coup des engrenages beaucoup plus rapprochés de la perfection qu'ils ne peuvent l'être par les anciennes méthodes.

De l'engrenage du pignon de onze ailes, mené par une roue de 132 dents.

1327. Après avoir reconnu l'avantage des pignons de haut nombre, pourvu qu'ils soient employés, comme on l'a dit, sans exagération du nombre de leurs ailes (et nos observations précédentes s'y appliqueront également), il serait peu utile de revenir à cet égard sur notre mode d'application, mais les particularités qui leur appartiennent méritent toujours quelque observation. Dans le pignon de onze, la forme arrondie du fond des ailes pour leur donner plus de solidité peut servir d'exemple en cas opportun. Cette précaution a été prise ici parce que le pignon de cette figure engrenait avec un barillet de 132 dents, très-nombré relativement à son diamètre ; il en résultait une denture plus fine et des ailes du pignon plus faibles que dans les constructions ordinaires. L'on y avait encore suppléé par l'épaisseur de la roue et de sa denture, ainsi que par la hauteur en cage des ailes du pignon, augmentée en ce sens dans la même intention. La fig. 3 de la planche XXXIV a été gravée de même grandeur que le dessin tracé exprès pour cet engrenage.

1328. Un tour de barillet de 132 dents produit nécessairement 12 tours d'un pignon du centre de onze ailes. Le rayon primitif du pignon doit donc être contenu onze fois dans celui primitif de la roue ; et pour la condition *plus une*, la distance des centres doit contenir 12 fois le rayon primitif du pignon. L'épaisseur de l'aile est ici un quart du rayon primitif du pignon. La profondeur des vides de celui-ci est 4/11ᵉˢ du même rayon, comptés en dedans de la circonférence primitive jusqu'au fond de l'arrondi des vides. L'excédant demi-cylindrique sur le rayon primitif se trouve être de 1/8ᵉ du rayon primitif du pignon, c'est-à-dire moitié de l'épaisseur entière d'une aile, comme on l'a déjà vu. L'excédant de la roue est le tiers du rayon primitif du pignon, en y comprenant le surplus de courbe pour sûreté de la pointe des dents. La denture est taillée autant plein que vide, la courbe de son excédant est indiquée dans la figure par un cercle qui embrasse 3 dents pleines ; mais c'est une erreur de la gravure, et nous avons fait observer (note de l'article 1319 et que nous rappelons de nouveau) que le rayon du cercle est ici trop grand et rend la courbe ogive trop plate. Ce centre ne doit pas être au milieu de la dent intermédiaire comme servant à former l'ogive de deux dents ; il n'y doit former qu'un côté d'ogive, en prenant son centre sur un des flancs de la même dent, à 3/5ᵉˢ de la hauteur de ce flanc, à partir du bas. Le flanc opposé doit recevoir de même le centre du cercle qui forme un autre côté d'o-

give (1). Il est essentiel que, dans l'exécution, les parties droites, ou les flancs des ailes en particulier, soient dirigés au centre et accordés juste avec les excédants de leur mobile, sans altérer l'étendue de la partie droite de leur rayon primitif. La division doit y être précise, pour ménager le peu d'ébat de l'engrenage; car ce n'est qu'à cette condition que l'on peut obtenir des ailes aussi fortes que celles de la figure, dans ce pignon au-dessous de 12, et y éviter les accotements de rentrée.

On peut, du reste, employer ces mêmes dispositions avec une roue de moindre nombre, en établissant toujours les rapports des rayons primitifs et la distance des centres, conformément à celui des nombres de la roue, comme du pignon. *Les circonférences primitives y étant comme les nombres, la même fraise en divisera les flancs.*

De l'engrenage du pignon de 12 ailes.

1329. Le pignon de 12 de la pl. XXXV, fig. 1re, est mené par une roue de 96 dents; c'est

(1) Les proportions de cet engrenage furent destinées à remplacer des pignons de 9 mal faits, trop longtemps employés dans les montres marines d'un artiste qui s'essayait en ce genre; elles devaient être remontées une fois en 24 heures; 2 barillets dentés ne développaient que 2 tours du ressort dans cet espace de temps, quoique ce ressort fort mince permît 10 à 12 tours au barillet; mais on ne voulait en employer que les 2 tours du milieu. Le ressort blanchi, poli et parfaitement calibré par M. Vincent, alors le plus habile artiste en ce genre, avait un tirage dont le développement ne différait pas de plus d'un 10e de force en 24 heures; il était légèrement diminué en fouet, mais bien moins que pour une fusée. Il y avait échappement libre, balancier compensateur et spiral isochrone aussi bien établis que possible, comme l'exige ce genre de pièces. J'entrepris de porter dans le reste du rouage les attentions développées dans les articles actuels. J'y employai en effet la méthode de calcul expliquée dans les articles ci-dessus, et, pour être certain de l'exactitude des mesures, j'avais fendu, arrondi et terminé moi-même toutes les roues avec soin, par la méthode de burins, que j'exécutai exprès; les vides de la denture de la roue étaient également arrondis au fond comme ceux du pignon (mais dans la fig. 3, pl. XXXIV, cet arrondi du fond de la denture ayant été oublié, on y a suppléé depuis par les demi-cercles pointillés). Chaque mobile était porté par deux ponts ajustés et fixés l'un à l'autre par des pieds particuliers, indépendants de la platine, et ces doubles ponts pouvaient ensuite être mus ensemble sur leur vis commune, de manière à trouver aisément le degré précis de l'engrenage, en examinant ses effets à contre jour, comme il a été dit dans l'un de nos articles; alors la place de la patte plus large d'un des deux ponts était fixée en définitive à la platine par d'autres pieds; tous les autres pignons et les dentures étaient de même forme quant à l'arrondi du fond de leurs vides. Le succès des proportions dépassa ce qu'on en espérait; ce n'était pas un hasard heureux, car je terminai ainsi de suite et à la fois les rouages de trois horloges marines, qui avaient le même degré de perfection. Ces trois rouages coulaient avec tant de douceur et d'égalité, que l'artiste en faveur de qui je les avais entrepris en comparait, dans son extase, l'effet à celui de rubans de soie se développant sur des poulies parfaitement tournées; je lui fis observer que cet avantage n'était dû qu'à l'application scrupuleuse des principes de la théorie (que malheureusement il connaissait trop peu, ainsi que bien d'autres principes), et que je n'y avais d'autre part personnelle que d'avoir fidèlement suivi ceux-ci, ce que tout artiste intelligent pouvait faire également, et cela était exactement vrai; je ne rapporte donc ce fait que comme l'une des diverses preuves avérées de l'avantage de se faire une méthode soignée et exacte d'appliquer aux rouages les principes théoriques trouvés par la science, démontrés par l'analyse et vérifiés par l'expérience. J'ai eu depuis d'autres occasions de faire la même application dans divers cas, avec un égal succès, ce qui peut rassurer, à l'égard de la nouveauté de cette méthode, ceux qui apprécieront la sincérité de ce traité entrepris dans le seul intérêt de l'art.

le second de la série de hauts nombres, mais réellement le premier qui offre toute la force désirable de l'aile, avec un ébat suffisant dans son engrenage, et avec des dents de roue aussi pleines que vides. Cette figure suffit pour en obtenir les proportions réduites dans l'exécution. Mais nous allons encore en reproduire ici une partie pour compléter la gradation de cette série.

1330. L'épaisseur de l'aile du pignon de 12 est les 2/9es de son rayon primitif, et la demi-épaisseur d'aile se trouve en conséquence de 1/9e de ce même rayon primitif, ou moitié de l'aile suivant la règle constante. La profondeur du vide prise en dedans de la circonférence primitive peut être établie à 3/9es du rayon primitif du pignon. Le plein de l'aile est au vide comme 8 est à 11, car, le plein de l'aile étant 2/9es, ou 8/36es même valeur, le vide sera de 11/36es; total pour plein et vide 19/36es du rayon primitif du pignon.

1331. L'excédant total de la roue est au plus 8/27es du rayon primitif du pignon; mais la partie utile, c'est-à-dire la hauteur de l'excédant où parvient le point de contact à la fin de la menée, n'est que de 7/27es du rayon primitif du pignon, y compris même un peu de sûreté. On peut donc, en frisant la pointe des dents de la roue, en retrancher 1/54e du rayon primitif du pignon. La division de la denture, étant finie d'égalir, doit la rendre autant pleine que vide. C'est toujours ce que l'on a supposé dans ces engrenages; car, la fraise de l'outil à fendre laissant une taille trop rude, il faut, pour adoucir les flancs avec la lime *grise* de l'outil, que la fraise ait laissé les dents un peu pleines. Mais avec la division au burin, dit crochet, ou échoppe, quand sa coupe est bien nette, cette précaution n'est plus nécessaire. Du reste, on consultera la fig. 1re, pl. XXXV, pour le pignon de 12 dont il s'agit, et l'on pourra même y établir une roue d'un nombre assez différent, soit en plus, soit en moins, sauf la différence du rayon primitif de la roue et de la distance des centres, suivant leurs rapports avec les nombres respectifs, ainsi qu'on l'a toujours recommandé comme condition essentielle.

Engrenage du pignon de 14 ailes mené par une roue de 84 dents.

1332. On ne sera point surpris que nous omettions le pignon de 13 ailes, encore moins usité que ceux de 9 et de 11, et pour les mêmes raisons; 11 et 13 ont de plus le désavantage des nombres 1ers qui n'ont pas de diviseurs. Si des nombres particuliers de révolutions ou des rapports obligés l'exigeaient, on pourrait aisément en dessiner la figure en grand, ou l'établir de suite conforme aux dimensions de l'exécution, d'après la méthode de calcul que nous avons exposée. Les mesures des mobiles impairs tiennent d'ailleurs un moyen terme entre celles des nombres pairs voisins; c'est pourquoi nous ne ferons pas mention de ceux de 17 et 19 ailes, encore moins usités. La méthode expliquée précédemment leur est applicable au besoin, et nous pouvons y renvoyer; les figures et le texte des nombres pairs y suffiront.

L'épaisseur de l'aile du pignon de 14 est les 2/10es de son rayon primitif; l'excédant de ce rayon est la moitié de l'épaisseur de l'aile ou 1/10e; la profondeur du vide prise en dedans de la circonférence primitive est 1/4 du même rayon.

La hauteur de l'excédant de la roue formé par les deux courbes de l'ogive est, à leur point d'intersection, 5/20es ou 1/4 même mesure, celle du rayon primitif du pignon ; mais, la dent menant toujours par moins de degrés, avec les pignons d'un plus haut nombre, et la partie de la courbe utile à la menée n'étant ici qu'au-dessous de 4/20es du rayon primitif du pignon, on pourra retrancher de la pointe de la dent au moins 1/20e du rayon primitif du pignon, et il restera encore beaucoup de sûreté.

Engrenage du pignon de 15.

1333. Le nombre d'ailes de ce pignon est impair ; mais, comme on l'emploie dans quelques *régulateurs*, il paraît utile d'en donner ici les principales dimensions. Toutes celles de ces engrenages conviennent aussi exactement aux rouages des Pendules qu'à ceux des Montres et à ceux des grosses Horloges ; parce que le principe est général, ainsi que nous l'avons annoncé plus d'une fois, malgré le préjugé contraire qui suppose faussement des proportions d'engrenage différant de la Montre à la Pendule.

L'épaisseur de l'aile du pignon de 15 est les 2/11es de son rayon primitif, la demi-épaisseur d'aile formant pour le pignon l'excédant de son rayon primitif est par conséquent 1/11e. La profondeur du vide entre deux ailes est 3/11es de la même mesure prise en dedans de la circonférence primitive. L'excédant de la roue jusqu'à sa pointe serait aussi de 3/11es; mais, comme on peut en retrancher 1/11e, il s'en faudra de cette quantité que l'extrémité des dents ne touche au fond du vide du pignon. La partie utile de l'excédant (la partie qui mène) n'a que 2/11es juste. La denture toute finie doit rester autant pleine que vide; on peut du reste arrondir le fond des ailes.

Engrenage du pignon de 16.

1334. L'épaisseur de l'aile de ce pignon est les 2/12es de son rayon primitif, la demi-épaisseur de l'aile formant son excédant est par suite 1/12e ; la profondeur du vide est 7/24es pris comme ci-dessus. L'excédant des dents de la roue jusqu'à leurs pointes est 3/12es, la partie utile n'est que 2/12es; la pointe à retrancher est 1/36e du rayon primitif du pignon (base générale de nos mesures de détail) : denture finie, autant pleine que vide ; l'ogive de celle-ci a été tracée par le moyen décrit page 245.

Les dents, au nombre de 192, seront divisées pour avoir, toutes finies, autant de plein que de vide. Le cercle qui trace l'excédant comprend trois dents pleines. Le centre de ce cercle est au milieu des deux flancs de la dent intermédiaire, et l'on cherchera la hauteur de son centre vers la moitié de leur hauteur ; on y observera les précautions recommandées de raccord pour qu'il ne jarrète pas avec le flanc. Quand les pignons, ainsi que les roues, sont de hauts nombres, ils exigent toujours une meilleure division des dents et des ailes, au moyen d'outils à plate-forme plus parfaits ; car l'ébat devient ordinairement plus précis dans l'engrenage, à mesure que les nombres des mobiles sont augmentés. Une division défectueuse fait toujours perdre plus ou moins de l'uniformité de la menée. NOTA. *Aux fig.* 2 *et* 3 *les ailes sont trop pleines.*

Pignon de 18 ailes.

1335. L'épaisseur de son aile est 2/14es de son rayon primitif. La demi-épaisseur formant son excédant est par suite 1/14e. La profondeur du vide des ailes prise comme ci-dessus est 5/21es du rayon primitif. L'excédant de la roue a, jusqu'à sa pointe, 3/14es; la partie utile est 7/56es, la pointe peut être un peu retranchée. La denture finie, toujours autant pleine que vide.

Pignon de 20 ailes.

1336. L'épaisseur de l'aile est 2/16es de son rayon primitif. La demi-épaisseur ou excédant, 1/16e. La profondeur du vide est 15/64es. L'excédant de la roue jusqu'à sa pointe, 13/64es. La partie utile 2/16es y compris la sûreté, car il y a à peine 7/64es d'utile. Denture finie, autant pleine que vide. Ces mesures sont également prises sur le rayon primitif.

1337. Nous ne donnons point les figures de ces engrenages; ce que nous avons dit dans le cours de nos articles sur ce sujet doit suffire pour les tracer ou pour les calculer, et par la même raison nous ne porterons pas plus loin cette série de pignons de hauts nombres ; outre que nous ne conseillons point d'en user au delà de ceux que nous avons décrits, nous avons déjà donné à entendre et nous prouverons ailleurs que, dans les conséquences conclues d'après les meilleurs principes, il y a un terme où l'on est forcé de s'arrêter ; et qu'en portant ces conséquences à l'extrême on y rencontre des inconvénients plus nuisibles que ceux que l'on voudrait éviter. L'application rigoureuse de certains principes a ses limites au physique comme au moral, et les vérités par déduction ne sont, la plupart du temps, que relatives. En mécanique délicate, on en a souvent la preuve dans l'avantage des proportions moyennes sur celles qui sont portées trop loin. On a toujours obtenu plus de régularité de l'Horloge astronomique à secondes, d'un moyen volume, dont le pendule, de moyenne pesanteur, n'a que 3 pieds 8 lignes 1/2 de longueur *virtuelle* (3 p. 8 l. 571/1000, à Paris, niveau de la mer), qu'avec des instruments de moindre dimension, ou qu'avec ces belles et fortes Horloges de ville, où l'on n'a rien négligé des soins qui leur sont propres. Si les pignons de bas nombre ont, même dans leur principe théorique, le défaut d'arc-boutement avant la ligne des centres, les pignons d'un nombre trop élevé sont exposés à une trop grande proximité entre le revers de l'aile qui va être menée et la courbe de la dent qui fait sa rentrée. Les moindres inégalités de la denture de la roue ou du pignon peuvent y occasionner un accotement plus fort que l'arc-boutement rentrant des pignons de bas nombre. Le moindre changement de pénétration par l'agrandissement, ou le jeu trop grand dans l'origine, des trous des pivots suffirait à produire ce défaut, contre lequel on n'aurait plus assez de sûreté. En voulant tenir la denture des roues aussi pleine que vide, la forme des dents s'allonge de plus en plus ; il faut alors que le vide des pignons augmente en profondeur, et les ailes deviennent longues, maigres et d'autant

plus faibles : on s'en aperçoit déjà dans nos dernières figures, et il en résulte qu'elles sont moins convenables aux pressions des premiers mobiles ; à cet égard, les pignons de 12, 14, 15 et 16 au plus, suffisent à l'ordinaire. Du reste, les pignons des derniers mobiles peuvent aussi n'avoir de hauteur en cage qu'un peu plus que l'épaisseur des roues qui les mènent ; on peut y pratiquer de larges et profondes creusures sur les deux faces, afin de réduire d'autant le poids et l'inertie si contraires au mouvement dans ces derniers mobiles, en leur réservant toutefois la solidité nécessaire. Puis, ainsi que nous l'avons déjà dit, on se rappellera toujours qu'avec des mobiles de très-hauts nombres il faut pouvoir compter d'avance sur la grande précision des instruments qui serviront à les diviser. *(On a vu que l'ogive un peu coupée permet des ailes moins enfoncées.)*

Des pignons qui mènent les roues.

1358. En traitant ci-dessus des roues qui mènent les pignons, cas le plus fréquent en horlogerie, nous avons fait remarquer la proportion différente qui convient aux pignons lorsque, au contraire, ceux-ci mènent les roues ; ce qui n'a guère lieu que pour ralentir le mouvement de quelques mobiles, tels que la roue d'heure ou de canon d'une minuterie, ou les roues d'une équation ou d'autres longues révolutions astronomiques. On emploie aussi ce moyen pour acquérir de la puissance aux dépens du temps, principalement dans les fortes machines. Nous avons déjà signalé l'insignifiance de la prétendue mesure ordinaire, qui se borne à recommander de tenir les pignons *un peu plus gros* quand ils mènent, vu que ces mots ne sont pas plus une mesure pour un art tendant à la plus parfaite précision, qu'ils ne le seraient dans une démonstration théorique, où ils ne seraient certainement pas admis. Une indication si vague était d'ailleurs au niveau de l'*à peu près* des mesures vulgaires qu'elle accompagnait. Notre méthode toute pratique n'admettant que des rapports précis ou avertissant toujours des cas où la théorie muette nous réduit aux tâtonnements, nous ne négligerons pas ici la règle précédemment annoncée et relative aux pignons qui mènent des roues.

La théorie néanmoins s'étend fort peu sur la question des pignons menants, qu'elle considère comme résolue généralement par les principes du tracé des engrenages. Les auteurs d'horlogerie ne s'en expliquent qu'en passant, et rejettent l'emploi des pignons dits *à lanterne* menants, qui arc-boutent alors par leur nature avant la ligne des centres pendant toute leur menée, comme on le verra plus loin à l'article de ces pignons. Quant à ceux *à ailes* des deux plus bas nombres, on sait que l'allongement obligé de leur ogive butterait dans sa rentrée. Pour établir les proportions du pignon de 8 menant, nous avons eu recours à la machine décrite p. 100 et suivantes de notre première partie et aussi page 245 de cette seconde partie, qui nous a fourni les courbes pour la grandeur de la figure 4 de la planche XXXIV.

En employant ce moyen, ainsi que tout autre tracé théorique, on trouve donc d'abord

que les pignons menants de 6 et de 7 comportent cette impossibilité de rentrée, et que ce n'est qu'au pignon de 8 qu'il est permis de la produire sans arc-boutement rentrant et avec uniformité de menée. Mais les ailes de ce pignon, et de tous autres qui mènent, doivent alors être divisées autant pleines que vides. Ici, dans la fig. 4 ci-dessus, la hauteur de l'ogive substituée à l'arrondi ordinaire peut avoir trois fois et un quart celle de l'arrondi du pignon mené, qui, ayant son aile beaucoup moins large (ou moins épaisse), porte d'elle-même un arrondi d'autant moindre; c'est ce qui est indiqué par les parties pointillées de la figure. Généralement, pour avoir la grosseur totale et exacte des pignons qui mènent, il faudrait tracer en grand leur engrenage avec la roue; car les résultats dépendent beaucoup, et du nombre des ailes, et de la division réglant l'épaisseur ou largeur des dents, et de la nécessité de conserver des rentrées faciles et sûres. C'est alors que l'on peut au besoin retrancher avec certitude entière la portion d'ogive du pignon qui ne contribue pas à la menée. C'est aussi ce qui détermine le diamètre total laissé au pignon, et bien plus sûrement que par une règle générale. Ici, en traçant le pignon dont l'ogive agit par une grande partie de sa courbe et sert d'autant mieux à régulariser l'ébat, pour la raison qu'on verra au *Nota* plus bas, on a dû y laisser toute la hauteur de l'ogive jusqu'à la pointe, qui, mesurée à partir de la circonférence primitive, est égale à une épaisseur ou largeur entière de l'aile, plus un huitième de cette mesure, vu que le plein de l'aile est ici égal au vide, mesurés sur la circonférence primitive. Mais, si l'on compare ce pignon menant au pignon mené par la même roue, l'ogive du pignon menant prenant, en comparaison, par la largeur de son aile, beaucoup plus de hauteur que n'en aurait l'arrondi du pignon de même nombre mené par la même roue, il en résulte que le diamètre total du pignon menant surpassera celui total du même pignon mené de plus de 1/4 de ce dernier; en sorte que, le diamètre total du pignon mené étant 7, celui du même pignon menant devient 9, différence considérable et positive, tout autre que ne l'exprime la mesure vague et vulgaire : *un peu plus gros*. Cependant, dans ces deux pignons, les diamètres primitifs restent absolument les mêmes, c'est-à-dire toujours dans le même rapport que celui entre les nombres du pignon et de la roue, que nous concevons ici n'être pas changés et avoir la même distance des centres. Le reste est indiqué par les ailes et arrondis pointillés du pignon ordinaire mené, que l'on peut remarquer dans cette même fig. 4.

On a pointillé aux autres pignons de cette même planche XXXIV les ogives qu'ils pourraient porter s'ils menaient leur roue; mais, comme cela dépend de la division et largeur des ailes dont nous venons de parler et qui n'est pas changée dans les figures, le plan de pareils engrenages de pignons menants fait en grand serait plus sûr; car ceux trop faibles qui se trouvent pointillés ne conviennent que pour les cas où l'uniformité de menée n'exige pas une rigueur absolue, et ne sont ici qu'une indication provisoire.

NOTA. La figure de notre pignon de 8 menant une roue de 96 dents, donnée ici comme exemple régulier pour ces nombres, a été cherchée, comme il a été dit plus haut, pour mener avec uniformité une roue d'heure dont l'aiguille, unique sur le cadran, devait marquer les subdivisions de l'heure de cinq en cinq minutes, et avoir par

ce motif, très-peu d'ébat dans son engrenage; aussi n'y est-il rien retranché de la pointe d'ogive du pignon. La perpendiculaire au flanc mené de la dent de roue indique que, relativement à l'étendue de la menée, on aurait pu aisément enlever sur le tour un 6e de la hauteur des ogives du pignon menant; mais leurs pointes, ne gênant point dans les rentrées, où elles ont la sûreté d'ébat nécessaire, servent à réduire celui-ci en le rendant moins inégal pendant la menée, comme l'exige l'indication plus précise de l'aiguille d'heure sur le cadran. Du reste, si la forme ogive est conservée ici tout entière, on ne doit pas oublier qu'ailleurs cette condition n'est pas toujours essentielle, et qu'on n'y conserve la pointe qu'autant qu'elle ne nuit pas.

On verra plus loin, dans la démonstration théorique, que l'excédant *ogive* du pignon menant est déterminé par le point décrivant *b* d'un cercle générateur F *r b*, fig. 1, pl. XXXV, roulant sur la circonférence primitive du mobile *menant* dont ce point trace l'ogive épicycloïdale, et roulant en même temps dans l'intérieur de la circonférence primitive du mobile *mené*, où ce même point trace aussi le flanc droit au centre; le cercle générateur ayant toujours dans ce cas, pour diamètre, la moitié de celui du mobile *mené*. C'est ce qui se trouvera plus explicitement détaillé dans cette exposition de la théorie, dont doivent pleinement se pénétrer ceux qui essayent de résoudre mécaniquement le problème intéressant, mais d'une exécution difficile, de « construire une machine propre à tailler et « arrondir *les dents des plus petites roues, suivant la vraie courbe épicycloïdale.* »

1339. On doit aussi conclure de tout ce qui précède que, soit que l'on augmente ou que l'on diminue le nombre des ailes et *en même proportion* celui des dents de deux mobiles qui s'engrènent, le nombre des révolutions reste le même, vu que les rayons primitifs et la distance des centres n'en sont aucunement changés, et que les *leviers primitifs* restent aussi les mêmes (en quoi l'inexpérience pourrait facilement errer); car un pignon et sa roue ayant tous deux leurs nombres doublés, ce qui conserve toujours entre eux le même rapport, n'en deviennent ni plus gros ni plus grands *au primitif*. La seule dimension *totale* diminue au contraire quelque peu, parce que les dents et les ailes, devenant ici moitié plus petites, ont leurs excédants moins élevés ou moins saillants au delà des circonférences primitives restées les mêmes; tout comme, en cas de diminution *proportionnelle* des nombres, les dents et les ailes étant d'autant plus larges, et leurs excédants d'autant plus saillants, leur diamètre total s'en augmente un peu, sans qu'il y ait de changement à leurs dimensions dites *primitives* (qui sont les vraies et seules bases des rapports). Ainsi, dans les deux cas, la distance des centres, les leviers apparents et virtuels et la force transmise restent les mêmes, sauf une légère différence de frottement dans la menée; car les mêmes engrenages, avec des mobiles plus nombrés, ont réellement un peu moins de frottement, vu que les ogives y mènent moins en avant, et que c'est vers la fin de la menée que le glissement ainsi que le frottement de menée, démontrés inévitables, augmentent sensiblement plus que les arcs parcourus; or, la difficulté d'exactitude propre de l'outil à diviser et arrondir les dents et les ailes, et le déplacement des pivots par leur jeu, ne permettent pas d'exagérer, soit une augmentation des nombres, bien que *proportionnelle*, si elle produisait des dentures trop fines, soit une diminution analogue qui, en rendant les dents trop larges,

augmenterait d'autant le frottement de la menée vers la fin d'action d'une ogive trop étendue, lorsque même celle-ci pourrait rentrer; mais quelques dents de plus ou de moins sont praticables, en y conformant toujours les rapports des rayons, nombres et distances.

Il pourrait aussi paraître suffisant à la première vue de renverser la situation de deux mobiles, pour que celui *qui mène* devînt le mobile *mené* (voyez à ce sujet la fig. 8, pl. XXXIII, renversée faute de place; mais ce serait une erreur; car, en laissant aux dents et aux ailes leurs mêmes dimensions et divisions, la menée aurait lieu tout entière en arc-boutement vicieux avant la ligne des centres, où elle se terminerait. L'inspection seule de la figure le démontre assez; cet effet provient de la division et dimension différente des dents, comparées aux ailes, le mobile qui mène devant presque toujours avoir autant de vide que de plein, et le mobile *mené* avoir alors sa division plus vide que pleine); nos explications précédentes et suivantes indiquent assez cette loi générale et nous dispensent de nous arrêter sur ce sujet.

1540. On se rappellera que nous avons déjà remarqué plus d'une fois que l'ancienne proportion de l'engrenage a, d'une part, le défaut de produire beaucoup de frottement en arc-boutant au commencement de la menée des pignons de bas nombre; mais que, d'autre part, avec l'échappement à roue de rencontre pour lequel ces proportions furent cherchées dans leur origine, l'effet du recul de cette roue dégage l'arc-boutement d'une manière suffisante. Mais nous avons dit que les échappements à repos étant très-répandus, et le dégagement du recul n'ayant plus lieu, on a remarqué que l'arc-boutement porté à l'ancien degré, et lorsqu'il se rencontre à la fois sur plusieurs pignons aux moments de repos, produit souvent une résistance assez grande au départ pour suspendre totalement la transmission de la force motrice. Quelques praticiens avaient imaginé, comme nous l'avons aussi dit ailleurs, d'y remédier par une pénétration d'engrenage exagérée au point de ne faire commencer la menée des pignons de bas nombre qu'à la ligne des centres, en altérant en ce sens l'ancien principe; mais ils n'ont évité ce désavantage avec les échappements à repos que pour tomber dans un autre encore pire, celui de produire à la fin de la menée des glissements irréguliers et des chutes qui, en faisant varier très-sensiblement la force, ont de plus le défaut de détruire les parties en action. Pour parer à la fois à ces deux inconvénients, nous avions expérimenté et adopté depuis longtemps la modification que nous avons dû donner d'abord au commencement de ce chapitre, contre l'ordre naturel, celui des premiers travaux connus; car si, avec la pratique vicieuse actuelle dont nous venons de parler, nous eussions débuté par l'ancienne théorie, des esprits impatients, et qui jugent avant d'avoir lu tout ce qui concerne une question, auraient pu croire que nous voulions ramener l'engrenage à l'enfance de l'art; c'est donc là ce qui nous a déterminé à commencer par notre méthode modifiée, qui s'accorde mieux avec la nécessité actuelle des échappements à repos.

Cependant ceux à roue de rencontre étant aussi très-répandus, il convient de s'occuper des proportions qu'ils comportent, et qui sont surtout essentielles pour l'engrenage *de champ*. On conçoit qu'il ne s'agira, dans ces articles, que des pignons au-dessous de 10,

vu que, pour ceux au-dessus, nos proportions et celles de l'ancienne théorie restent les mêmes.

Camus, que nous citons souvent, a commencé ses articles sur l'engrenage par la figure et l'explication de pignons menés ou menants de 5 ailes, qu'on ne retrouve guère aujourd'hui que dans quelques machines anciennes et défectueuses, au moins sous ce rapport; il avait probablement en vue la simplicité des figures et de leur explication, en même temps qu'une exposition plus historique: il passe de là à la démonstration géométrique du principe général, et ensuite à l'article des pignons *à lanterne* à 8 fuseaux, que nous donnerons un peu plus loin. Mais lorsque *Camus* en revient aux pignons en ailes, menés par des roues plates, il paraît qu'il estime si peu les pignons de bas nombre, qu'il ne parle aucunement du pignon de 6, le plus désavantageux, en effet, de cette série; il a commencé par le pignon de 7, jusqu'à celui de 10, où finissent ses articles sur ce sujet. Nous laisserons d'abord de côté le début de cet auteur, relatif aux pignons de 5, inusités aujourd'hui, pour rapporter seulement ceux de ses articles qui conviennent parfaitement aux rouages avec échappement à recul, et nous donnerons ici ceux qui concernent les pignons de 7 à 10 ailes

Au sujet du pignon de 7, l'auteur emploie une solution trigonométrique tendant à prouver la nécessité de faire commencer la menée de ces pignons avant la ligne des centres. Nous la mettrons, pour cette fois seulement, sous les yeux des lecteurs assez avancés dans ce genre.

Engrenage avec un pignon de 7 ailes, extrait de Camus.

1341. « Une roue de 50 dents ne peut pas conduire *uniformément* un pignon de 7 ailes, « en poussant les ailes uniquement après la ligne des centres.

« Pour que les ailes du pignon de 7, fig. 1 de démonstration, pl. XXXVI, ne soien « poussées qu'après la ligne des centres, il faut que la dent C E G conduise l'aile H B « jusqu'à ce que l'aile suivante A B soit arrivée dans la ligne B F des centres, pour être « conduite à son tour après cette ligne; et comme, dans le pignon de 7 ailes, l'angle A « B H, compris entre deux flancs par lesquels deux ailes voisines peuvent être poussées « du même côté, est de 51° 25′ 43″, à peu de chose près; lorsque la dent C E G quittera « l'aile H B, l'angle F B H sera aussi de 51° 25′ 43″, à peu de chose près (c'est-à-dire *quel-* « *ques tierces*).

« En supposant que le rayon primitif A B du pignon de 7 ailes est de 7 parties, et ré- « solvant le triangle A B E rectangle en E, on trouvera B E de 4 parties, *plus* 0,364 *mil-* « *lièmes*,

« Le rayon primitif A B du pignon de 7 ailes étant supposé de 7 parties, et la roue ayant « 50 dents, son rayon primitif A F sera de 50 parties; et la distance B F des centres du « pignon et de la roue sera de 57 parties. Donc on connoîtra, dans le triangle E B F, les « deux côtés B E et B F avec l'angle E B F qu'ils renferment, et résolvant ce triangle (*par*

« *la méthode trigonométrique connue*), on trouvera l'angle E F B de 3° 35′ 50″ à très-peu « près.

« La roue étant supposée de 50 dents, l'angle B F C, ou A F C, qui doit former le plein et « le vuide d'une dent, sera de 7° 12′; et si de cet angle on retranche l'angle E B F qu'on « vient de trouver de 3° 35′ 50″, il restera 3° 36′ 10″ pour l'angle C F E.

« Les deux épicycloïdes C E, G E, qui terminent une même dent, devant être égales, « semblables, et semblablement placées par rapport au rayon vrai (total) F E, et l'an- « gle C F E ayant été trouvé de 3° 36 10″, l'angle C F G, qui doit contenir le plein d'une « dent, sera de 7° 12′ 20″ et se trouvera, par conséquent, de 20″ plus grand que l'angle A F C « qui doit contenir le plein et le vuide d'une dent : ce qui est impossible, puisque la *somme* « *des parties* ne peut pas être plus grande que le *tout*. Donc aussi il est impossible qu'une « roue de 50 dents puisse conduire uniformément un pignon de 7, en ne poussant ses « ailes uniquement qu'après la ligne des centres; or, puisqu'une roue de 50 dents ne « peut pas mener uniformément un pignon de 7 ailes, en ne poussant ses ailes qu'a- « près la ligne des centres, une roue qui aura moins de 50 dents sera encore moins « propre à le faire. Et quoique, dans une roue de plus de 50 dents, il puisse arriver « que l'angle nécessaire pour le plein d'une dent *devienne* moindre *encore*, *compa-* « *rativement à l'espace* qui doit comprendre son plein et son vuide, ce qu'il y auroit « pour le vuide entre les pieds de deux dents voisines seroit toujours si peu de chose, « qu'il ne suffiroit pas pour recevoir l'aile du pignon, à moins qu'on ne la fît excessive- « ment maigre : et dans le cas même où cette aile pourroit être faite aussi mince qu'on le « voudroit, il n'y auroit point assez de place entre les dents pour le jeu de l'engrenage. « On peut donc conclure qu'une roue de tant de dents qu'on voudra n'est pas propre à « conduire un pignon de 7, en ne poussant ses ailes qu'après la ligne des centres. Ainsi, « lorsqu'on aura un pignon de 7 à faire mener par une roue, il faudra que ses ailes « soient poussées par les dents de la roue, en partie avant et en partie après la ligne des « centres, comme on le voit dans la fig. 2 du pignon de 7, même planche. »

On voit dans cette figure que l'arc-boutement avant le centre est d'une très-majeure partie de l'épaisseur de l'aile; si l'on appliquait cette solution au pignon de 6, on y trouverait une imperfection encore plus grande, c'est-à-dire que la dent de sa roue y arc-bouterait d'autant plus avant la ligne des centres que l'aile du pignon y serait plus épaisse ou plus large; sa réduction même à la ligne mathématique n'y suffirait pas.

On remarquera de plus, dans cette fig. 2 de la pl. XXXVI, les lignes pointillées *r b* R et R G divisées et numérotées, ainsi que celle G B des centres; elles ont rapport à la démonstration importante de l'*uniformité* de menée de tout engrenage régulier, soit avec la méthode ancienne, soit avec la nôtre modifiée, démonstration développée dans les deux paragraphes précédents (1322-23), où se trouvent les renvois à cette même fig. 2.

Engrenage du pignon de 8 ; extrait de Camus, fig. 3, pl. XXXVI.

1342. « Une roue de 57 dents, et même celle d'un plus grand nombre de dents, n'est « pas propre à conduire uniformément un pignon de 8, en poussant ses ailes uniquement « après la ligne des centres. »

L'auteur applique à cet article le même raisonnement que ci-dessus, d'où il conclut qu'il y aura, à la vérité, place pour une aile extrêmement mince; mais il termine son observation comme il suit : « Or l'angle de ce vuide (entre deux dents) n'étant pas assez grand « pour recevoir une aile raisonnable, avec un jeu convenable à un bon engrenage, on « doit conclure qu'une roue de 57 dents n'est pas propre à conduire un pignon de 8 en « poussant les flancs de ses ailes uniquement après la ligne des centres, et comme une « roue d'un plus grand nombre de dents n'auroit pas un vuide beaucoup plus grand entre « les dents, comme il est aisé de le prouver par un calcul semblable à celui qu'on vient « de faire, elle ne seroit guère plus propre à conduire un pignon de 8 en poussant ses « ailes après la ligne des centres seulement.

« Ainsi, lorsqu'on aura un pignon de 8 à faire conduire uniformément par une roue de « tant de dents qu'on voudra, il faudra faire pousser ses ailes par les dents de la roue, « d'abord avant, et ensuite après la ligne des centres, comme on le voit dans la fig. 3, « même pl., *où l'aile est menée de sa moitié avant le centre.* »

Du pignon de 9 ailes d'après Camus.

L'auteur applique ici les mêmes observations, pour le fond, à ce pignon de 9 que nous n'avons pas représenté, vu son peu d'usage, et par économie de place; il conclut du reste dans le même sens en faisant remarquer que les ailes praticables au pignon de 9, pour n'être menées qu'après la ligne des centres, deviendraient encore trop faibles, et qu'il est nécessaire qu'elles soient menées partie avant, mais en plus grande partie après la ligne des centres qu'aux pignons précédents.

Du pignon de 10 ailes, d'après Camus, fig. 4, même planche.

« Un pignon de 10 ailes *pourra* être conduit uniformément par une roue de 72 dents, « qui poussera les flancs de ses ailes uniquement après la ligne des centres, *pourvu* qu'on « fasse ce pignon un peu plus vuide que plein. »

Nous avons déjà donné ce passage ailleurs, et nous ne le rapportons ici que pour liaison avec ce qui suit. (L'article suivant est relatif à une figure supposée dont les ailes sont de beaucoup plus maigres que dans la fig. 4, tirée aussi de *Camus;* nous n'avons pas représenté cette figure si maigre, parce que la fig. 4 peut également servir à l'extrait qui suit, que nous donnons encore pour compléter la méthode de l'auteur.)

« Lorsque la dent C E G quittera l'aile H K et que le flanc A N de l'aile suivante sera « dans la ligne des centres, l'angle H B F sera de 36°. Or, supposant que le rayon primitif « A B du pignon de 10 ailes sera de 10 parties, on trouvera B E de 8 parties plus

« 0902 (dix-millièmes). La roue étant supposée de 72 dents, son rayon primitif A F sera « de 72 parties. On connoîtra donc dans le triangle E B F les deux côtés B F et B E avec « l'angle qu'ils renferment ; et, résolvant ce triangle (*par la même méthode trigonomé-* « *trique que ci-dessus*), on trouvera son angle B F E de 3° 36′ 22″.

« La roue ayant 72 dents pleines et 72 vuides, l'angle B F C, qui contiendra un plein et « un vuide, sera de 5°. Ainsi l'angle C F E sera de 1° 23′ 38″, et l'angle C F G sera par « conséquent de 2° 47′ 16″.

« Enfin, si l'on retranche l'angle C F G de l'angle B F C, il restera 2° 12′ 44″ pour l'an- « gle A F G du vuide qui sera entre deux dents ; et comme cet angle sera presque égal à « celui C F G qui comprend une dent, il est assez grand pour recevoir une aile raisonna- « blement forte avec un jeu convenable (*pour la sûreté d'ébat, ce sera bien tout au* « *plus, comme nous l'avons dit ailleurs*). Ainsi, une roue de 72 dents peut (*à la rigueur*) « conduire uniformément un pignon de 10, en poussant les flancs de ses ailes après la « ligne des centres seulement, *pourvu* que l'on fasse le pignon un peu plus vuide que « plein. (*On suppose ici une exécution parfaitement exacte.*)

« La roue de 72 devant être un peu plus pleine que vuide pour conduire un pignon de « 10 ailes, si l'on vouloit que les vuides fussent égaux aux pleins, comme c'est l'usage, il « faudroit nécessairement que les ailes de ce pignon de 10, dans lequel cette roue engre- « neroit, fussent prises par les dents de la roue un peu avant la ligne des centres, comme « dans la fig. 4, » *et même avec ailes plus maigres et dents plus pleines.*

On voit par l'exposé de l'article de Camus sur le pignon de 10, et que nous avons rapporté en entier, comme à l'appui de nos articles, que cet auteur s'accordé ici avec ce que nous avons déjà dit de la difficulté d'exécution de ce pignon, lorsque l'on veut absolument qu'il ne soit mené qu'après la ligne des centres, et qu'il s'ensuit que, quand le pignon de 11 ou celui de 12 sont praticables dans un rouage, ceux-ci, comportant à la fois des ailes fortes et un ébat plus libre, sont bien préférables.

A la suite de ces articles de *Camus* viennent quelques observations générales déjà citées et accompagnées de guillemets dans quelques autres articles précédents (voyez, en arrière, nos pages 258 et suivantes).

Tandis que nous traitons des rouages avec recul de la planche 36, nous en laisserons pour le moment les deux fig. 5 et 6, relatives aux pignons *à lanterne*, pour passer à la planche 37, concernant l'engrenage de champ, encore plus assujetti aux effets du recul de l'échappement à verge, qu'il accompagne nécessairement dans les Montres.

De l'engrenage de la roue de champ, dite aussi à couronne, et de son recul avec l'échappement à roue de rencontre. (V. pl. XXXVII.)

1343. Parmi les diverses applications de l'engrenage aux effets d'horlogerie, celui de la roue *de champ* avec le pignon de la roue de rencontre est reconnu généralement pour le plus difficile à bien établir : la mesure totale de roue de champ n'est pas la même que celle d'une roue plate de pareil nombre avec le même pignon ; l'action de la denture

prend une direction différente; la situation de l'engrenage au milieu d'autres pièces de construction, dans les Montres, empêche d'en observer librement les effets de détail, etc. Cependant la régularité de cet engrenage est essentielle, parce que sa proximité de l'échappement y porte une influence directe. Aussi la suppression de l'engrenage de champ est-elle comptée au nombre des principaux avantages des échappements à repos, qui n'exigent que des roues plates. Mais, comme nous l'avons dit ailleurs, l'emploi de l'échappement à roue de rencontre est très-répandu et peut l'être encore longtemps, et l'étude de l'engrenage de champ, inévitable alors, devient d'autant plus nécessaire qu'il présente plus de difficultés; il peut aussi être utile dans d'autres cas.

1344. Le recul libre de la roue de rencontre, exigé par l'échappement à verge, se transmet immédiatement au pignon d'échappement, et a besoin d'y éprouver la plus grande facilité; c'est néanmoins ce qui manque la plupart du temps. Quelques auteurs ont recommandé de n'y faire commencer la menée que quand le milieu de l'épaisseur de l'aile du pignon est sur la ligne des centres, afin de diminuer l'arc-boutement du commencement de la menée; mais d'autres pensent, et avec raison, que ce qui est ainsi gagné dans ce sens est plus que perdu dans un autre; car, suivant eux, l'arc-boutement de toute l'épaisseur de l'aile est suffisamment dégagé par le recul de l'échappement, plus intense dans cette partie du rouage, tandis que l'autre aile, menée trop loin, perd beaucoup plus de sa puissance pour faire reculer la roue de champ. En effet, si, par exemple, on ne faisait commencer la menée que lorsque le flanc mené du pignon de 6 est très-près de la ligne des centres, l'aile précédente ayant alors marché plus avant, sa perpendiculaire *r b* formerait, avec le plan de la roue, un angle de plus de 45°, d'où il résulterait que plus de la moitié de la puissance du recul serait dirigée en pure perte vers la partie inférieure de l'axe de la roue de champ, en augmentant le frottement de sa portée, et qu'il ne resterait par suite que moins de moitié de la force pour faire reculer la roue. D'où il suit évidemment qu'en général la difficulté du recul diminue à mesure que l'aile est moins avancée, et qu'il est préférable de laisser plus d'arc-boutement au début de la menée, tant que celui-ci peut être assez facilité et dégagé par le recul. C'est ce que nous avons essayé de mettre en évidence dans les quatre figures, pl. XXXVII, des pignons de 6, 7, 8 et 10, menés par une roue de champ. Outre que ces figures peuvent servir d'exemple général pour la proportion des dentures de l'engrenage de champ, il est facile d'y remarquer qu'au pignon de 6, fig. 1re, où l'aile est menée de toute son épaisseur avant la ligne des centres, la perpendiculaire *r b* se trouve, à la fin de la menée, former avec le plan horizontal de la roue un angle de 40°, et que la puissance de recul y perd déjà presque la moitié de son intensité, qui se porte sur la partie inférieure de l'axe, en ne conservant qu'un peu plus de sa moitié, pour opérer le recul.

1345. Dans la fig. 2 suivante, pignon de 7, quoique l'aile entière soit toujours menée de toute son épaisseur avant le centre, le flanc mené est moins avancé à la fin de sa menée, et la perpendiculaire *r b* ne forme plus avec le plan horizontal de la roue qu'un angle de 33°; l'on conçoit qu'alors une moindre partie de sa puissance se portant vers le pivot inférieur, il en reste davantage pour opérer le recul, la perte y étant moindre.

Au pignon de 8 de la fig. 3, l'épaisseur de l'aile y étant attaquée de même tout entière avant le centre, la perpendiculaire *r b* du flanc ne forme plus avec le plan de la roue qu'un angle de 26°. *Nous laisserons de côté le pignon de* 9, *peu usité.*

1346. Enfin au pignon de 10, fig. 4, l'angle de la perpendiculaire du flanc avec la roue n'est plus que de 22°, environ moitié moins de celui du pignon de 6, ce qui permet à la direction de la puissance du recul d'approcher encore plus de celle du plan de la roue. Cette comparaison annonce donc que plus le pignon d'échappement sera nombré et plus il aura de facilité à produire le recul de la roue de champ, tandis que la menée, bien que commençant avant le centre de toute l'épaisseur de l'aile, a, d'après l'expérience générale, son arc-boutement dégagé suffisamment par ce même recul; les pignons de cette planche ayant tous leur plus forte épaisseur d'aile, ces épaisseurs se réduisent déjà à mesure que leur nombre augmente; et si on les amaigrit encore un peu plus, autant toutefois que la solidité et les inconvénients de la trempe le permettent, on réduira encore d'autant l'arc-boutement de ces pignons (1). Quant à la hauteur ou largeur du limbe avec sa denture comprise, elle est trop forte dans nos figures, et peut n'être que les deux tiers au plus du *diamètre* primitif du pignon, cette partie devant suivre les proportions ordinaires. Nous donnerons plus loin la théorie rigoureuse de l'engrenage de champ, non pour l'exécution en petit, qui n'en permet pas l'application complète, mais uniquement pour que le lecteur se pénètre mieux des principes vers lesquels il doit tendre. V., pour l'application des articles ci-dessus, la pl. XXXVII.

De l'engrenage avec le pignon dit à lanterne, *extrait abrégé de Camus. Pl. XXXVI.*

1347. Le nombre des dents d'une roue et le nombre des fuseaux de la lanterne que la

(1) Dans la disposition ordinaire de l'engrenage de champ, la difficulté du recul paraît être une des principales causes de la perte de liberté que l'on remarque dans l'échappement à verge, très-peu de temps après les réparations et le renouvellement *des huiles*. Dans les ouvrages anciens de ce genre (plus fidèles que ceux modernes destinés au commerce), on trouve les pivots, les trous de l'échappement, les palettes de la verge et le pignon de la roue de rencontre généralement beaucoup mieux conservés que dans les ouvrages actuels, où ces parties s'altèrent si promptement; on attribue cette différence principalement à la qualité du laiton actuel; car, pour l'acier, on peut l'avoir aujourd'hui d'une qualité au moins égale à l'ancienne, quand on fait la verge exprès, ou qu'on la fait exécuter par M. Perret, excellent artiste en ce genre. Mais les Montres anciennes avaient leur cage très-haute; la roue de rencontre y ayant d'autant plus de diamètre, agissait moins durement sur les palettes, le recul était moins sensible aux pivots en raison de l'allongement du rayon de la roue; la verge à filet, haute et grêle, était susceptible d'une certaine torsion élastique qui adoucissait dans le recul la résistance provenant du rouage. Actuellement, au contraire, les cages des mouvements à roue de rencontre sont très-basses, les verges entaillées ont leur tige très-courte et d'un plus fort diamètre; la pénétration exagérée des engrenages vient encore ajouter à la dureté des résistances. Au lieu d'attribuer l'usure à la seule qualité actuelle du laiton, qui peut bien en effet être inférieure, ne conviendrait-il pas d'avoir égard à ces autres causes? Ne pourrait-on pas, en employant le pignon de 12 au centre, comme on le faisait généralement jadis, appliquer celui de 10 à tous les autres mobiles, comme quelques artistes l'ont parfois pratiqué, notamment feu M. Vincent, frère de notre habile fabricant de ressorts, et directeur éclairé de l'ancienne manufacture d'horlogerie, à Belleville, près Paris? On n'aurait rien à changer au calibre, les dentures seules deviendraient plus fines, on laisserait aussi aux cages plus de hauteur, etc. Cette manufacture florissante, de 1785 à 1790, cessa alors avec la subvention nécessaire de 50,000 fr.

roue doit mener, étant donnés avec la distance F G de leurs centres, fig. 5 et 6, pl. XXXVI, il s'agit de déterminer le rayon primitif et le rayon total de la roue, la grandeur et la figure de ses dents, et la quantité de pénétration de l'engrenage. Tel est le problème dont la solution suffira pour l'application de la même méthode à d'autres nombres et grandeurs que ceux de cet exemple.

On supposera ici 30 dents à la roue, le moindre nombre, suivant *Camus*, pour un engrenage régulier avec une lanterne de 8 *fuseaux :* on appelle *fuseaux* des tiges cylindriques implantées intérieurement au bord de deux platines circulaires ou disques qui se nomment *tourteaux ;* ceux-ci sont contenus par la partie carrée d'un axe qui les maintient ensemble au moyen de portées, de goupilles, d'écrous, etc. Chaque fuseau a quelquefois deux pivots qui roulent dans les disques, et les fuseaux, mobiles ainsi et roulant chacun sur leur centre, adoucissent et réduisent beaucoup le frottement de cet engrenage, surtout lorsque, *par nécessité*, le pignon mène la roue.

On partagera d'abord la ligne F G des centres, fig. 5 et 6, pl. XXXVI, en deux parties qui soient entre elles comme 30 et 8, et, pour y parvenir aisément, on divisera la droite F G, distance totale des deux centres de la roue de la lanterne, en 38 parties, dont on prendra 8 parties pour rayon primitif de la lanterne, aboutissant au centre d'un fuseau ; et les 30 parties restantes seront le rayon primitif de la roue, ainsi les droites A F, A G seront les rayons primitifs de la roue et de la lanterne.

Pour déterminer la figure des dents, qui dépend en partie du diamétre des fuseaux, on supposera d'abord que les fuseaux sont infiniment déliés et représentés sur un plateau de la lanterne, fig. 5, par les 8 points A, E, H, I K, *i*, *h*, *e*; et lorsqu'on aura trouvé la figure des dents propres à conduire ces fuseaux infiniment déliés, dont on ne saurait faire usage dans la pratique, on corrigera la figure de ces dents, et l'on tracera par son moyen la véritable figure des dents exigées pour des fuseaux cylindriques d'un diamètre donné. Ce sera le sujet des deux parties suivantes.

1re PARTIE. *Figure des dents avec des fuseaux supposés infiniment déliés.*

1348. On conçoit aisément, d'après nos seules figures précédentes, et sans démonstration théorique, que, si le cercle primitif C A *c* de la roue qui touche E A *e*, cercle primitif du pignon, était garni à sa circonférence de dents épicycloïdales, le cercle E A *e*, ou un point quelconque de la circonférence primitive du pignon, serait conduit aussi uniformément par les courbes de ces dents que par le simple attouchement des circonférences primitives; dans le cas dont il s'agit, on conçoit aussi que ces dents ne peuvent conduire un tel point que, par leur côté convexe, et que, si la courbe de la dent était taillée de manière à conduire par le côté concave de son épicycloïde, ce ne pourrait être qu'en ramenant le fuseau vers la ligne des centres, passé laquelle il serait accroché par la dent, et ne pourrait plus s'en dégager. Nous faisons cette observation, parce qu'il est possible, pour les effets de certaines machines où le mouvement angulaire est borné, d'employer aussi des épicycloïdes concaves; mais on voit que ce n'est pas le cas avec des roues et des pignons roulants et qu'une épicycloïde concave ne peut pas conduire un fuseau au delà de la ligne des centres;

en sorte que l'épicycloïde C E doit nécessairement avoir cessé de mener le fuseau E de A vers E lorsqu'un second fuseau est arrivé en A sur la ligne des centres, pour être mené par une seconde dent, ou épicycloïde A B, et ainsi des autres fuseaux de la lanterne.

Si l'on veut que la roue puisse mener la lanterne des deux côtés, comme il est souvent utile de le pouvoir, au moins momentanément, dans les rouages d'horlogerie, il est évident que chaque dent de la roue doit avoir ses deux côtés opposés C E et L M formés en épicycloïdes égales, semblables et opposées; et que la dent C E, M L doit être assez longue pour conduire le fuseau E jusqu'à ce que le fuseau suivant A soit arrivé sur la ligne des centres.

Comme on a supposé les fuseaux de la lanterne infiniment déliés, si les dents de la roue étaient parfaitement figurées et espacées, on n'aurait besoin que de vides infiniment petits entre les bases des dents pour recevoir ces fuseaux; mais, faute de cette perfection, on serait obligé d'y laisser de petits espaces vides, tels que A L, ou moindres, c'est-à-dire proportionnés aux inégalités de division présumées.

Nota. On a toujours supposé que les dents de la roue mèneront les fuseaux de la lanterne; mais il est évident que les dents de la roue devraient avoir la même figure si elles étaient menées par les fuseaux. Il faut seulement remarquer que les fuseaux mèneraient les dents en arc-boutant vers la ligne des centres, et les abandonneraient lorsqu'ils seraient arrivés sur cette ligne, au lieu que les dents de la roue conduisent les fuseaux en les éloignant de la ligne des centres, seulement après qu'ils sont arrivés sur cette ligne, et en sortant d'engrenage, sens toujours plus avantageux.

Pour déterminer la figure des dents pour ces deux cas, après avoir d'abord arrêté, comme on l'a fait ci-dessus, les rayons primitifs de la roue et de la lanterne, et décrit leurs cercles (ou circonférences) au primitif; puis divisé le cercle primitif de la roue en autant de parties égales que de dents, c'est-à-dire ici en 30, et de même celui de la lanterne en 8 parties; il faut marquer à côté de toutes les dents de la roue les vides présumés nécessaires; alors on décrira par les extrémités des pieds de chaque dent deux épicycloïdes qui auront la circonférence primitive de la roue pour base et *tout le cercle primitif du pignon* pour *cercle générateur*. Par exemple, C L étant le pied d'une dent, on décrira, par les extrémités C et L de ce pied, deux épicycloïdes opposées C E P, L M P, qui auront leurs convexités du côté des dents voisines, et qui, ayant le cercle C A *c* pour base, auront le cercle primitif E, H, I, K, *i*, *h*, *e*, A pour cercle *générateur* (1). On fera de même deux épicycloïdes semblables et opposées à toutes les autres dents.

Les deux épicycloïdes opposées C E P, L M P, se terminant à leur point P de rencontre, elles fixent le plus grand rayon total F P que la roue puisse avoir; mais, lorsque le fuseau E a été mené jusqu'à ce que le fuseau A soit sur la ligne des centres, celui-ci pouvant être mené par la dent A Q N, le fuseau E n'aura plus besoin d'être mené. On pourrait

(1) Il est utile de remarquer ici que, pour le pignon à lanterne, c'est le cercle primitif entier de ce pignon qui sert de *cercle générateur;* tandis que, avec les pignons en ailes de nos articles précédents, ce n'est que le demi-diamètre, ou le rayon du pignon, qui donne le diamètre particulier de leur *cercle générateur :* cette différence provient de celle entre le flanc droit de l'aile et la rondeur du fuseau.

donc, à la rigueur, retrancher de la dent C P L toute la partie E P M, et ne conserver pour la dent que C E M L; alors la droite F E serait le plus petit rayon total que la roue pût avoir. Mais, pour ne point tomber dans les extrêmes et prévenir les défauts de division, il est toujours à propos de tenir le rayon total un peu plus grand que F E et un peu plus petit que F P; et supposant retranché le rayon primitif F C, le reste de C jusqu'à une hauteur moyenne entre E et P sera la quantité de l'engrenage de la roue dans la lanterne; c'est-à-dire que la hauteur C E sera rigoureusement la quantité de pénétration de la roue, à laquelle on pourra ajouter celle du rayon du fuseau dans la roue, quand il aura un diamètre déterminé, comme ci-après.

II° PARTIE. *De la figure des dents lorsque les fuseaux de la lanterne sont des cylindres d'un diamètre fini, c'est-à-dire déterminé.*

1349. On se servira du tracé de la figure précédente, que l'on supposera transporté à la fig. 6, même planche. On n'y aura qu'à réformer toutes les dents pour les faire accorder avec les fuseaux d'un diamètre fini que l'on veut employer au pignon.

Avec le rayon du fuseau donné, on décrira sur le plan de la dent, et en établissant les centres sur le trait de la dent précédente, autant que l'on pourra ou voudra de petits arcs, sur la sommité intérieure desquels on fera passer deux courbes, telles que R O et S O, qui seront parallèles aux épicycloïdes qui les renferment; et les espaces intérieurs R O S ou T Y V seront les figures des dents moins larges que la roue doit avoir pour conduire les fuseaux d'un diamètre donné, comme ceux de cette fig. 6.

Car, si l'on imagine que le centre E d'un fuseau est conduit par la dent C L P, la courbe R O, qui est parallèle à l'épicycloïde C P et qui n'en est éloignée que d'une quantité égale au rayon du fuseau fini E, touchera toujours la circonférence de ce fuseau: ainsi la courbe R O conduira la circonférence du fuseau cylindrique de la même manière que la dent plus large C P L conduisait le centre E de ce fuseau, et, par conséquent, la dent R O S aura la figure convenable pour conduire la lanterne à fuseaux cylindriques.

Si l'on veut corriger les premières dents C P L, A Q N de la roue, de manière que les nouvelles dents laissent entre elles des vides égaux à la largeur de leurs pieds, et si l'on veut que le jeu de l'engrenage soit toujours égal à A L de la fig. 5, on divisera le pied C L de la dent en deux parties égales par la droite D O, et, ayant pris de part et d'autre du point D deux parties D R et D S égales chacune au quart de l'arc A C, l'arc R S sera le pied de la nouvelle dent demandée. Ensuite, d'un rayon égal à la corde de l'arc C R, on tracera les cercles A, E, H, I, K, *i*, *h*, *e*, qui représenteront la grosseur des fuseaux de la lanterne. Enfin, on retranchera de la pointe des dents la portion inutile, mais avec la sûreté nécessaire, et la distance O F, de l'extrémité O de l'une de ces nouvelles dents au centre F de la roue, sera le plus grand rayon total dont celle-ci puisse avoir besoin.

Lorsqu'un fuseau E aura été conduit jusqu'à ce que le centre A du fuseau suivant soit sur la ligne G F des centres, le fuseau A sera conduit à son tour par la dent suivante T Y V, et alors il ne sera plus nécessaire que la dent R O S conduise davantage le fuseau cylin-

drique E. On pourra donc terminer la dent R O S au point X, où elle touchera le fuseau E lorsque le centre du fuseau suivant sera sur la ligne G F, ou du moins très-peu au-dessus, comme on l'a dit plus haut, fig. 5, pour le terme moyen de hauteur de la dent C P L, et la distance prise peu au-dessus, en X, fig. 6, jusqu'au centre de la roue, sera aussi le plus petit rayon total que la roue puisse avoir.

Pour déterminer en grand le point X où la dent R O S touche le fuseau E, on mènera par le centre de ce fuseau, et par le point A, la droite E A (qui répond ici à notre perpendiculaire *r b* au flanc d'une aile), et le point X où cette ligne E A rencontrera la circonférence du fuseau cylindrique, sera celui où la dent R O S touchera le fuseau, et cette ligne sera toujours perpendiculaire aux deux épicycloïdes.

Les dents de la roue étant ainsi construites, elles ne conduiront les fuseaux qu'après que leurs centres seront arrivés sur la ligne G F, et les fuseaux au contraire ne pourront conduire la roue qu'en menant ses dents vers la ligne G F, où ils cesseront leur action qui aura eu lieu en arc-boutant. C'est en partie pour cela, dans le cas où la lanterne mène la roue, et dans tous les cas pour réduire le frottement, lors même que la roue mène la lanterne, que l'on fait rouler les cylindres des fuseaux sur des pivots d'un tiers ou deux tiers plus petits que ces cylindres, suivant la solidité convenable.

Il y a encore quelques autres recherches dans Camus, concernant cette espèce d'engrenage, qui ne se pratique guère qu'en grand, surtout quand on veut faire les fuseaux avec des pivots. Mais ces recherches n'ajoutent pas beaucoup à l'exactitude bien suffisante ici de cette sorte d'engrenage, et ceux qui désireraient s'en instruire en trouveront les détails page 339 et suiv. du 4e vol. du Cours de mathématiques de *Camus*.

La figure des dents de la roue étant déterminée comme ci-dessus, il reste à enfoncer dans le limbe, au dedans de la circonférence primitive de la roue, des vides propres à recevoir le demi-diamètre des fuseaux finis, et même assez au delà pour éviter les accotements dans le fond des dents. Il y a, par suite de l'action des flancs des dents sur le fuseau à la lanterne, une petite partie de menée avant le centre qui exigerait, comme pour les ailes des pignons de bas nombre, une petite portion d'épicycloïde pratiquée, et qui ne peut avoir lieu avec des fuseaux roulant sur leurs pivots ; mais cet arc de menée avant le centre est tellement réduit, que la forme circulaire en remplit suffisamment les fonctions, tant aux fuseaux des lanternes, quand même ils ne rouleraient pas sur des pivots, qu'aux ailes des pignons susdits. L'usage de ces pivots n'est même utile absolument que quand la lanterne mène la roue ; du reste, ils peuvent adoucir aussi la menée produite par la roue, quand la dimension du mécanisme les permet. Au surplus, si l'on redoutait une légère quantité de menée avant la ligne des centres, il suffirait de tenir le rayon total de la roue un peu plus long, en ne retranchant que la légère pointe de l'ogive, pour lui faire mener chaque fuseau un peu plus avant.

1350. Camus, que nous avons abrégé et commenté quelque peu dans ces derniers articles relatifs aux pignons à lanterne, termine ce sujet par le paragraphe suivant :

« Comme les dents d'une roue doivent pousser les fuseaux fixes d'une lanterne en les « éloignant de la ligne des centres, et qu'il n'y a point d'arcs-boutements à craindre dans

« cette façon de conduire une lanterne, on peut sans aucun inconvénient faire mener une « lanterne par une roue. Mais, comme les fuseaux fixes d'une lanterne doivent au con- « traire pousser les dents d'une roue (lorsque la lanterne mène la roue), en rapprochant « ces dents de la ligne des centres, et qu'il peut arriver des arcs-boutements dans cette « manière de conduire une roue (la menée ne pouvant y avoir lieu que par un arc-boute- « ment ou frottement rentrant), on en doit conclure qu'il faut préférer un pignon à une « lanterne à fuseaux fixes, lorsqu'on a une roue à faire conduire. »

1351. On peut remarquer que, si le pignon en ailes qui conduit la roue doit avoir son excédant en épicycloïde ou ogive, comme nous l'avons décrit pour le pignon de 8, fig. 4 de notre planche XXXIV, relative aux observations de l'art. 1338, on peut dire aussi que, si les fuseaux d'une lanterne roulent sur pivots, leur arc-boutement, cité ci-dessus, sera très-doux, et qu'avec cette précaution de pivots on ne peut guère redouter l'arc-boutement d'une lanterne qui mène sa roue, surtout dans les pièces de grande dimension, ou pour des engrenages qui ne serviront qu'au remontage de la force motrice avec la main, ou autres cas analogues. Il n'en serait pas tout à fait de même dans des mouvements délicats, où les derniers mobiles exigent la plus grande liberté, vu que ces mobiles sont plus susceptibles de l'effet des huiles aux pivots; alors les pignons en ailes menants avec ogive sont préférables.

« Jusqu'ici, ajoute Camus, il n'a été question que des roues plates, dont les axes sont « toujours parallèles à ceux des lanternes ou des pignons qui engrènent avec elles : on va « maintenant parler des roues en couronne appelées communément *roues de champ*, dont « les axes sont ordinairement perpendiculaires à *ceux de leurs pignons ou lanternes* « (et peuvent, du reste, avoir leurs axes plus ou moins inclinés entre eux dans certaines « autres constructions, ce à quoi il faudroit en ce cas avoir égard), et l'on fera voir « que les lanternes et les pignons qui engrènent avec ces sortes de roues doivent être « coniques. »

1352. Nous avons précédemment donné (1343 et suiv.) des règles générales et pratiques pour l'engrenage de roues de champ dans les Montres, où ni les roues ni les pignons qu'elles mènent ne sont assujettis à la forme conique annoncée par Camus dans le paragraphe ci-dessus. Nous avons été guidé en cela par un usage assez motivé, car il serait fort difficile d'exécuter rigoureusement en petit des engrenages coniques; on y remédie d'ordinaire par le peu d'épaisseur donnée à l'ogive des dents. Si le limbe de la roue est vertical en dehors parallèlement à son axe, il est toujours un peu incliné du dedans, quelquefois même on incline aussi son dehors, et cela suffit pour l'usage commun. Cependant, ayant recommandé des études de mécanique, et donné au commencement de ce 2e volume quelques premières notions élémentaires sur ce sujet, nous exposerons ici un abrégé des principes développés plus au long pour *Camus;* car, bien que l'on n'ait point d'outils pour exécuter en petit suivant ses principes, et qu'on ne doive guère le tenter en Montre, à moins que pour un cas tout particulier, il ne sera pas inutile d'avoir une idée de la théorie qui pourrait améliorer dans l'occasion la pratique ordinaire, et particulièrement pour certains engrenages d'angles, qui, dans quelques compositions, exigeraient une

menée uniforme, soit à l'égard des échappements, soit pour d'autres communications de mouvement d'une précision obligée (1).

De l'engrenage de champ conique et à lanterne, suivant la théorie de Camus.

1353. « Soit fig. 1, pl. XXXVIII, un cône droit C A P B Q T, dont le sommet C demeure « immobile : si l'on fait rouler la base A P B Q T de ce cône sur un plan R E S placé « comme on voudra par rapport au point C, et si l'on imagine un style ou traçoir situé « au point A de la circonférence du cercle roulant, ce style décrira pendant ce mouvement « une courbe A M G F qu'on appelle *épicycloïde sphérique*. Le style A étant toujours à la « même distance du point C, tous les points de la courbe A M G F seront sur la surface « d'une sphère qui aura ce même point C pour centre. Le cercle primitif de la lan- « terne A P B Q T est encore ici le *générateur* de la courbe dont R A E F S est la base.

« Si le sommet C du cône n'est point dans le plan R E S, la surface du cône C A T « s'appuiera toujours sur la circonférence convexe d'un autre cône droit C R A E F S ; « et, comme le plan d'un cercle peut être un cône plus ou moins obtus, on peut dire « que l'*épicycloïde sphérique* A M G F est engendrée par un style A attaché à la surface « convexe d'un cône droit, dont le sommet C est arrêté avec celui d'un autre cône droit, « et qui roule sur la surface courbe de cet autre cône droit. »

Nota. Nous ne rapportons de l'article de Camus que le cas où l'axe du cône droit du pignon est parallèle au plan du bord R A N E F S de la roue, le seul applicable à la situation à angle droit des deux axes dans la Montre. Le principe peut d'ailleurs se généraliser sous toutes les inclinaisons.

« Ainsi, pendant que le point A, commun à la surface convexe et à la base d'un cône « roulant, tracera une *épicycloïde sphérique* A M G F, un autre point quelconque *a* de la « surface convexe du même cône tracera une autre épicycloïde sphérique *a m g f* à la « surface d'une sphère intérieure qui aura *a* C pour rayon ; en sorte qu'une partie quel- « conque A *a* d'un côté A C du cône roulant engendrera la surface convexe du tronc « d'une espèce de demi-cône à base ovaloïde, terminé par les deux épicycloïdes sphé- « riques A M G F, *a m g f*, parallèles et semblables.

« Comme la base A P B Q T du cône roulant applique successivement toutes les parties « de sa circonférence sur celles de sa base A N E F, cette base doit nécessairement être de « même longueur que la circonférence du cercle A P B Q T, et chaque portion, telle que

(1) Quant à l'exécution de l'engrenage ordinaire de champ, les lecteurs de cet ouvrage ne peuvent guère être supposés en ignorer les moyens pratiques. Nous leur recommanderons seulement ici l'emploi des bouchons filetés en vis et percés concentriquement, moyen facile de chercher la hauteur en cage de la roue de champ, pour la juste pénétration de son engrenage avec le pignon d'échappement. Alors, si l'on a eu la précaution de tracer le cercle primitif du pignon sur sa face, située exprès à fleur de l'intérieur de la denture de la roue, et si l'on a tracé aussi au dedans de cette roue le cercle qui passe au pied des ogives, en faisant coïncider ces deux cercles, on aura la juste pénétration de l'engrenage. Nous avons déjà recommandé ce moyen, avantageux en divers cas. D'autres détails de main-d'œuvre seraient superflus pour des lecteurs censés avoir déjà fait au moins un bon mouvement à roue de rencontre, avant que d'entreprendre l'étude des principes théoriques.

« A D ou A E de la même base, doit aussi être égale à chaque partie A B ou A T de la « base du cône roulant, ou de la circonférence, qui a roulé sur elle. » Il en est de cette conséquence comme de la mesure d'une base droite, sur laquelle roule un cercle générateur, lorsqu'on lui fait tracer une simple cycloïde, ou lorsqu'on la détermine par des points rapprochés autant que possible afin de rendre plus régulières les diverses portions de cette courbe.

« Ainsi, lorsque la zone sphérique sur laquelle l'épicycloïde sphérique doit être tracée « sera donnée, et que l'on connoîtra la grandeur et la position du cône roulant qui doit « engendrer cette épicycloïde, il sera aisé de trouver tant de points qu'on voudra de la « courbe, car si l'on décrit, fig. 2, autant de cercles A P B Q T égaux à la base du cône « roulant qu'on veut avoir de points de l'épicycloïde, et que l'on prenne sur les circon- « férences de ces cercles, à commencer du point A, des arcs A P, A B, etc., du cercle gé- « nérateur, égaux aux arcs A N, A D, etc., de la base de la roue, compris entre l'origine « A de l'épicycloïde et les points d'attouchement N, D, E, etc., les points A, M, G, etc., « appartiendront à l'épicycloïde sphérique A G F, et la courbe que l'on fera passer par « tous ces points (multipliés encore plus au besoin) sera l'épicycloïde sphérique elle- « même. »

On conçoit qu'il en est de même pour l'épicycloïde sphérique et intérieure *a m g f*, que l'on pourrait tracer sur une autre sphère intérieure qui aurait *a* C pour rayon ; mais on en a peu de besoin, puisque le point intermédiaire *a* du même rayon A C la trace naturellement en même temps que l'épicycloïde extérieure.

« Il suit de tout ce qu'on vient de voir que, si l'on taille dans une portion de sphère « creuse une portion de tronc de cône dont la surface convexe soit terminée par les deux « épicycloïdes A M G F, *a m g f*, qu'on vient de construire, cette portion d'*épicycle* du « tronc de cône *ovaloïde* conduira le cône C, A B P Q T, en le poussant par la portion A *a* « de son côté, de la même manière que le conduiroit le cône sphérique C, R E F S en lui « communiquant son mouvement par le simple attouchement, ou par un engrenage infi- « niment petit, et que la base du cône du pignon tournera avec la même vitesse que la « base du cône de la roue. »

On a vu à l'article de la roue plate menant un pignon à lanterne comment on en trace les dents pour un pignon à fuseaux supposés infiniment déliés. Il en est de même des dents de mobiles coniques. Nous ne répéterons donc pas ici cette première supposition, et nous passerons de suite aux mobiles coniques, où le pignon a ses fuseaux d'un diamètre fini, ou déterminé.

Des dents d'une roue de champ qui conduit une lanterne à fuseaux coniques d'un diamètre fini; application en grand.

1554. « On tracera d'abord les dents de la roue fig. 1, pl. XXXVIII, comme si elle « avoit à conduire une lanterne à fuseaux infiniment déliés, en observant d'y laisser l'ébat « entre les dents; ensuite, ayant fait une lanterne à fuseaux coniques, fig. 2, dont tous

« les sommets se réunissent au centre C de la ceinture sphérique dans laquelle on a taillé « ou tracé les dents épicycl., on marquera sur la surface extérieure de cette ceinture « le diamètre qu'un fuseau aura à l'endroit A, qui répondra à cette surface (qui n'est vue « dans la figure qu'en perspective) ; et l'on marquera pareillement sur la surface inté- « rieure de la même ceinture le diamètre que le même fuseau aura au point *a*, où il ren- « contrera cette surface.

« Les diamètres que les fuseaux auront dans les surfaces opposées de la ceinture sphé- « rique dentée, étant ainsi marqués, on prendra sur ces mêmes surfaces les cordes des « moitiés des arcs auxquels ces diamètres répondront. Ces cordes, qui ne seront pas « sensiblement plus longues que les rayons d'un fuseau, mesuré aux endroits où il sera « rencontré par les deux surfaces sphériques de la ceinture, étant prises pour rayons, « on décrira sur les faces extérieure et intérieure de chaque dent le plus que l'on pourra « de petits arcs qui auront leurs centres sur les premières grandes épicycloïdes entre les- « quelles les faces des dents seront renfermées ; puis, après avoir fait passer par tous les « sommets de ces petits arcs des courbes telles que O M, V N, qui seront nécessairement « parallèles aux épicycloïdes premièrement tracées, et qui formeront les parties courbes « des nouvelles dents propres à mener les fuseaux coniques (d'un diamètre fini) dont on « vient de parler, on fera dans le champ de la roue au-dessous du cercle primitif R Y S, « des enfonçures telles que V X, Z Y, et terminées par des plans (ou flancs) qui passeront « par l'axe de la roue et par les naissances V Y des nouvelles courbes parallèles aux épi- « cycloïdes. Les courbes O M, V N et les flancs droits O P, V X de chaque nouvelle dent, « étant tracées sur les surfaces extérieure et intérieure de la ceinture sphérique, on taillera « les dents de manière qu'une droite A *a*, fixée par son extrémité au centre C de la cein- « ture dentée, étant promenée le long des côtés P O M, X V N de la face extérieure de « chaque dent, s'applique exactement sur les surfaces latérales de ces dents ; et l'on aura « une roue propre à mener la lanterne à fuseaux coniques, pour laquelle elle a été con- « struite. » *V X, Z Y seront un peu plus enfoncés qu'un rayon.*

Quant aux pignons en ailes et de figure conique, ce qu'on a vu jusqu'ici sur la mesure et la forme des mobiles, et ce qui vient d'être dit sur les pignons à lanterne, le tout joint aux figures, peut suffire pour concevoir la construction du pignon en ailes de forme conique. Nous n'avons pas rapporté à ce sujet l'article assez long de Camus, auquel nous renvoyons au besoin, afin de terminer ici cette matière déjà trop étendue. Nous nous bornons donc au dernier avertissement suivant de l'auteur concernant les pignons en ailes et de forme conique.

Dernier avertissement terminant les articles de Camus.

1355. « On n'a considéré le cône du pignon en ailes (dans l'article de Camus sur ce « sujet) que dans le cas où les flancs de ses ailes sont entièrement plans. Mais, pour « éviter les arcs-boutements qui pourroient se faire, si les dents rencontroient quelques « ailes avant le plan des axes, on est obligé de tenir le cône du pignon plus gros

« ne l'a trouvé » (afin d'avoir, au delà de son diamètre primitif, la matière nécessaire à la hauteur voulue de ses excédants, ainsi qu'il résulte des observations suivantes).

« Si l'on grossit le cône du pignon de manière que chaque diamètre soit augmenté « d'une quantité égale à l'épaisseur que les ailes auront à l'endroit de ce diamètre (c'est-« à-dire à sa circonférence primitive), on pourra se contenter d'arrondir en forme de « demi-cône toutes les parties dont les ailes se trouveront allongées, et cette précaution « sera suffisante pour éviter les arc-boutements.

« Si les ailes du pignon doivent être prises par les dents de la roue avant le plan des « axes (cas des pignons de bas nombre), et conduites par conséquent en partie quel-« conque vers ce plan, il faudroit, *suivant la rigueur du principe*, que les courbures de « leurs bouts eussent la forme d'épicycloïdes sphériques engendrées par le mouvement « d'un cône droit qui auroit pour diamètre le rayon du cercle qui passe par les naissances « des courbures de toutes les dents de la roue (c'est-à-dire par les extrémités des rayons « primitifs de la roue). Ce cône droit roulant auroit son axe parallèle à la surface de la « roue, et son sommet dans l'axe du pignon. Ces épicycloïdes étant tracées, on formeroit « les surfaces courbes du bout des ailes par le moyen d'une ligne droite qui passeroit par « le sommet du cône du pignon, et qu'on feroit glisser suivant ces épicycloïdes.

« Pour loger les augmentations des ailes entre les dents de la roue, on fera dans le « champ de cette roue, au-dessous de la circonférence du cercle qui passe par les nais-« sances des courbes de toutes les dents (et représente la circonférence primitive), des « enfonçures suffisantes, contenues entre des plans menés par les naissances des cour-« bures de ses dents et par l'axe de la roue. » (V. les fig. relatives de la pl. XXXVIII.)

Quant à la courbe des excédants des ailes, dont il s'agit ci-dessus, nous avons déjà remarqué ailleurs, qu'avec les pignons en ailes, le peu d'épicycloïde du mobile mené est décrit théoriquement, *par un* point d'un autre cercle générateur ayant pour son diamètre le simple rayon de la roue qui mène, et dans l'usage, *par un* simple demi-cercle.

1356. On voit par ces derniers articles que les détails dans l'exécution des engrenages d'angle avec des roues et des pignons coniques sont peu praticables en petit, même avec la dimension ordinaire de la Pendule, et que d'ailleurs les moyens usités de l'art n'offrent pas jusqu'ici d'outils propres à reproduire en nature toutes les conditions exigées par la théorie, surtout avec l'engrenage de champ. On a donc dû se borner à éluder avec le moins de désavantage possible ces difficultés, 1° en faisant le pignon d'échappement de forme cylindrique, comme tous les autres; 2° en déversant en dehors, comme le pratiquent quelques-uns, le limbe et la denture de la roue, considérés comme la *corde* de l'arc sphérique indiqué par la théorie; ou, plus communément, en amincissant intérieurement et dans le même sens de déversement la partie du limbe qui porte la denture, ce qui rend aussi la dent progressivement moins épaisse vers la pointe de l'ogive; 3° en arrondissant et polissant la coupe, ou l'épaisseur des dents, de manière qu'elle ne touche l'aile que par le milieu de cette épaisseur; 4° en tenant la denture plus vide que pleine, afin de faciliter sa déviation à l'entrée et à la sortie de l'engrenage, qui diffèrent en cela de la direction constante d'une règle dentée. On observera, d'ailleurs, que, si l'étendue des surfaces en

action est ici plus réduite, c'est aussi la partie du rouage où il y a le moins de force appliquée. Tout cela prouve toujours ce que nous avons dit au commencement de nos articles sur ce sujet : « Que l'engrenage de champ est le plus difficile, et celui qui exige le plus « de soins raisonnés, » bien que tous en exigent. Cependant, si on y porte ces soins de détail, en consultant aussi ce qui concerne les fig. de la planche XXXVII, si le rapport entre les rayons primitifs du pignon et de la roue est conforme au rapport entre les nombres, comme nous l'avons tant recommandé, ou, pour employer l'expression usuelle, si le pignon *est de grosseur* avec la roue qui le mène, on pourra obtenir dans l'engrenage pratique de champ un résultat assez satisfaisant. Ce qui y nuit le plus ordinairement, c'est que le pignon est bien rarement de la grosseur voulue (étant la plupart du temps trop petit), et qu'on n'est pas dans l'usage de s'en assurer, ni de mesurer les deux mobiles par la seule et vraie méthode que nous avons signalée (1264 et 1265). Or, quand les pignons ne sont pas *de grosseur*, il n'y a pas moyen d'en obtenir des engrenages réguliers, ni d'en rendre la menée uniforme; et, lorsque l'on ne se détermine pas à refaire de tels pignons, ou à leur conformer le diamètre d'une nouvelle roue, en donnant à celle-ci sa vraie mesure, celle que le pignon *bien mesuré* exige, on n'a d'autre ressource, trop souvent insuffisante, que de tâter et de varier la pénétration de l'engrenage, en y évitant autant que possible le trop d'arc-boutement, la grande résistance au recul, les accotements, etc. Mais il est rare que la chose soit praticable et suffisante, même en renonçant à l'uniformité de la menée. Celle-ci ne s'obtient jamais que d'une proportion juste, et où la pénétration se trouve également déterminée. Au reste ces dernières observations concernent principalement le *rhabillage*, car, s'il s'agit de faire le *neuf*, on n'a d'autre parti raisonnable à prendre que de suivre avec exactitude les principes qui régissent la matière et que nous avons donnés, ou de copier en petit nos figures avec tous les soins recommandés, au moyen de la méthode indiquée; ce sera déjà un grand acheminement vers la perfection requise (1).

(1) Dans un article précédent (1334), page 269, concernant l'engrenage d'une roue de 192 dents avec un pignon de 16, pl. XXXV, fig. 3, nous n'avons pas indiqué les dimensions relatives des mobiles, qui du reste, là comme ailleurs, se retrouvent toujours par les nombres. La roue-modèle en bois de 192 dents avait 28 pouces de rayon primitif et le pignon mené de 16 ailes avait son rayon primitif de 28 lignes, c'est-à-dire qu'il était le 12e du rayon primitif de la roue, en même rapport que les nombres; la figure citée doit porter en effet ces mêmes dimensions. On a vu que c'est ce rayon primitif du pignon qui forme le diamètre entier du cercle générateur, lequel, roulant sur la circonférence primitive de la roue, trace l'épicycloïde de ses dents au moyen du point décrivant et d'intersection *b*, partant de la ligne des centres, et que ce même point *b*, du cercle générateur, roulant en même temps dans l'intérieur du cercle primitif du pignon, y trace aussi le flanc droit de chaque aile (v. l'art. 1288 et suiv.). On voit ici un arc pointillé sur les deux dernières dents de la droite, et de grandeur à correspondre autant que possible à la plus grande partie de l'arc d'épicycloïde employé; il doit un peu déborder la vraie courbe à l'approche des flancs, comme il est inévitable, parce que c'est la portion la plus courbe de l'épicycloïde. On a oublié dans la gravure de laisser paraitre le centre du cercle pointillé, mais il est facile de le retrouver. Les graveurs négligent toujours quelques parties, parce qu'ils ne sont ni horlogers ni théoriciens. Dans la planche XXXVII, par exemple, la denture qui mène le pignon de 6, figure 1, a sa courbe un peu trop plate vers le haut; les dents qui mènent le pignon de 10, figure 4, devraient être un peu plus pleines, etc.

Les deux modèles en bois que nous venons de citer ci-contre ont été réduits au 33e dans l'exécu-

1357. Nous devons avertir que les quatre roues de champ de la pl. XXXVII sont représentées marchant de *gauche* à *droite*, comme à toutes les autres figures, soit dans *Camus*, soit ailleurs, et que nous avons suivi en cela l'usage général. Cependant on ne voit l'engrenage de champ dans la Montre qu'au fond de la cage et seulement par la face intérieure des dents, laquelle renverse l'action de *droite* à *gauche* ; mais il sera facile d'appliquer les diverses observations sur ce sujet dans le sens opposé à celui des figures qui représentent l'action, comme si l'œil était du côté de la roue de rencontre supprimée. D'ailleurs, si l'on considère la planche par l'arrière, à contre-jour et comme en transparent, ou si l'on regarde le trait réfléchi par une glace étamée, on y verra alors l'action renversée dans le même sens qu'elle paraît au fond de la cage, et alors, comme elle, vue par la face intérieure de la denture.

Nous avons déjà dit que l'habitude des mesures vulgaires et fausses nous a obligé de donner à cette méthode inédite d'application plus d'étendue que si elle était adressée à des lecteurs au fait des principes géométriques de ce genre, comme le sont ou doivent l'être les mécaniciens. Nous laisserons du reste l'intelligence de nos lecteurs suppléer à d'autres détails, comme conséquences des principes exposés. Il ne nous restera sur ce sujet qu'à faire connaître un peu plus loin et succinctement quelques modifications plus modernes appliquées à la forme des dentures ; mais nous exposerons d'abord ici, en preuve de ce qui précède, la démonstration géométrique tant promise, et à laquelle nous avons souvent renvoyé dans le cours de ces articles.

1358. Parmi les démonstrations qui se trouvent dans plusieurs auteurs d'horlogerie et autres ouvrages, et qui, en procédant diversement, arrivent toujours aux mêmes résultats, nous avons préféré celle du savant astronome et mathématicien *Lalande ;* quoique plus longue, elle nous a paru plus accessible aux artistes pour lesquels elle a été originairement composée par son auteur (1). Cette démonstration n'exige du lecteur que le sentiment naturel de géométrie que possèdent les esprits droits, intelligents et réfléchis, et tout au plus le souvenir de quelques premiers principes du chapitre 6, tome Ier,

tion en petit, et le rayon de la roue se trouve réduit à environ 10 lignes, avec 192 dents, paraissant alors très-fines comparativement ; cette roue mène un pignon de 16 proportionnellement réduit, taillé sur une plate-forme à fendre les roues, faute d'un outil spécial qui nous manquait alors en province. L'ensemble forme néanmoins un excellent engrenage dans une petite machine destinée à des expériences sur l'uniformité du mouvement circulaire continu ; nous possédons encore cette machine, ainsi que les modèles en bois qui ont servi à tracer l'engrenage très en grand de la même figure 3, pl. XXXV, rappelée au commencement de cette note.

(1) Cette démonstration, moins rigoureuse, mais plus développée que celle des autres auteurs, a été insérée dans le traité d'horlogerie de *Lepaute*, avec deux autres chapitres très-instructifs du même savant ; celui-ci occupe 30 pages de Lepaute, mais, comme quelques-uns de nos paragraphes précédents en ont été extraits, et que d'autres contiennent en partie les mêmes observations que Lalande, nous avons pu réduire et renfermer sa démonstration en moins de pages, et l'on pourra y vérifier que notre méthode n'est, ainsi que nous l'avons annoncé, que l'application directe des principes géométriques que *Lalande* expose ici, et dont le résultat est le même au fond chez tous les auteurs qui ont traité ce sujet. Mais Lalande y développe davantage le raisonnement, et ses explications sont plus à la portée de ceux qui commencent à étudier cette matière.

pages 225 et suivantes, sous le titre de *Premières notions de Physique générale.* Cela posé, nous laisserons le savant s'exprimer lui-même, comme il suit.

DÉMONSTRATION DU PRINCIPE GÉOMÉTRIQUE DE L'ENGRENAGE.

« J'espère, dit *Lalande*, que la grande facilité avec laquelle on va déterminer les courbes nécessaires pour un engrenage parfait, au moyen des simples éléments de la géométrie, pourra inspirer aux artistes jaloux de se distinguer par la perfection de leurs ouvrages le désir d'acquérir le peu de connaissances géométriques que supposeront les principes suivants..... Pour comprendre la suite du discours, il faut entendre quelques propriétés des *épicycloïdes* qui vont être expliquées succinctement (nous en avons parlé ailleurs, mais l'exposition est ici plus étendue, et dans ce genre la répétition ne nuit pas).

« I. Si l'on conçoit un cercle A, fig. 1, pl. XXXIX, rouler sur une ligne droite C D, ainsi qu'une roue sur le pavé, et qu'on choisisse un point quelconque E de ce cercle, on verra que dans le mouvement du cercle le point E en partant du point C aura décrit une courbe C E D appelée (simplement) *Cycloïde ;* le *point décrivant* E sera parvenu en D à la fin du mouvement, et la ligne C D sera égale à la circonférence du cercle A.

« Si le même cercle A, fig. 2, au lieu de rouler sur une ligne droite, roule sur la circonférence d'un autre cercle C M D, le point décrivant E, en partant du point C jusqu'à ce qu'il soit arrivé au point D, décrira une autre courbe C E D, fig. 2, plus contournée que la première, et qu'on appelle *Épicycloïde* (1).

« II. Si le même cercle générateur *a* A, fig. 2, au lieu de rouler sur la circonférence extérieure ou convexe du cercle, se meut dans la circonférence intérieure de G en H, le point décrivant E qui était en G décrira une autre espèce d'épicycloïde G E H ; (il ne la décrirait plus, mais serait la même courbe que C M D, si son diamètre s'étendait depuis E jusqu'à la partie opposée P de la circonférence C M D, car son point de contact serait partout et ne pourrait changer).

« III. Si le cercle générateur, fig. 2, devient égal en diamètre à la moitié de celui du cercle dans lequel il roule, sa circonférence passera toujours par le centre K du cercle qui sert de base, et le point décrivant K ou E parcourra un *diamètre* I K F du même cercle. Il est facile de s'en assurer par expérience, en faisant deux cercles de carton dont l'un soit évidé, et d'un diamètre double de l'autre qui roulera au dedans ; mais on peut encore le prouver géométriquement de la manière suivante : puisque le diamètre du petit cercle est la moitié du diamètre du grand, sa demi-circonférence K O N sera égale au quart I N de l'autre cercle ; ainsi le point décrivant, que je suppose en K, sera arrivé au point I lorsque le demi-cercle K O N aura appliqué successivement tous ses points à ceux

(1) Les mots, *Un épicycle*, se traduisent littéralement par *un sur-cercle ; oïde*, ou εἶδος, *forme de... espèce de...* cette étymologie n'est donnée ici que pour justifier l'expression savante qui effrayerait un atelier auquel s'appliquerait assez le vers burlesque : « Ce mot *trop fort* l'épouvanta. »

de l'arc N I qui lui est égal; ainsi le point N parviendra en K, et le point K en I, sans avoir quitté le demi-diamètre K I.

« Si l'on doutait cependant encore que le point K du cercle K O N ait été perpétuellement sur une même ligne K I, prenons l'arc N O qui est un quart du cercle générateur et N P qui soit un huitième du cercle qui sert de base; il est sûr que ces deux arcs sont égaux, et que le point O arrivera en P; mais la ligne O K est égale à la ligne P R, puisque O K est la corde de 90° dans le petit cercle, P R la moitié de la corde de 90° dans le grand cercle, et que les moitiés du grand cercle sont égales aux touts dans le petit; ainsi, le point O étant en P, la ligne O K concourra avec la ligne P R, et le point K sera en R, c'est-à-dire encore sur le diamètre F L. On le démontrerait de même dans tous les autres points; donc le point décrivant K du petit cercle parcourra un diamètre du grand.

« IV. Reprenons l'épicycloïde de l'art. I, fig. 2, décrite par le cercle générateur A roulant sur le cercle C D. On sent assez que tous les points du cercle générateur s'appliqueront successivement sur autant de points de l'arc C D; par cette application successive le cercle A parcourra un arc C D égal à toute sa circonférence, et le point décrivant tracera sur ce papier une épicycloïde C E D.

« Mais il faut bien observer qu'il arrivera précisément la même chose, si l'on suppose que le petit cercle A soit fixé en l'air par son centre S, qu'il ait la liberté de tourner seulement sur ce centre, et que le cercle qui sert de base tourne aussi sur son centre K avec le papier sur lequel la figure est tracée, car le centre du cercle K ne changeant point de place, tandis que l'arc C D est mobile et fait tourner ce cercle générateur sur son centre particulier, ce sera la même chose que, lorsque l'arc C D étant fixe, le cercle A était mobile; tous les points du cercle générateur seront appliqués successivement à tous les points correspondants de l'arc C D, et le point décrivant E du cercle fixé en S, décrira sur le papier ou plan mobile de la figure la même épicycloïde qu'il décrivait sur le papier fixe, lorsque le cercle était mobile; la situation respective des parties de la figure sera la même dans les deux cas. Si le cercle K O N au lieu de rouler dans la circonférence du centre N P I, tourne autour du centre V fixe, tandis que le cercle N P I D, tournant autour de son centre K, entraînera le cercle K O N, par sa circonférence N, le point décrivant décrira la même ligne F I sur le plan du cercle N P que dans l'art. III.

« V. C'est une propriété essentielle de la cycloïde, et de toutes les épicycloïdes, que la ligne tirée du point de contact au point décrivant est toujours perpendiculaire à la cycloïde. C E D, fig. 3, est une portion de cycloïde décrite par le cercle A E D; le point décrivant est E; le point de contact, qui change continuellement, sera en A, lorsque le point décrivant E aura décrit la petite portion E *e* de la cycloïde; or l'on peut concevoir que dans ce moment-là le cercle A E D tourne d'une très-petite quantité sur le point A, de manière que la ligne A E décrit un petit arc E *e* d'un cercle H E G dont le centre est en A, ce cercle sera confondu avec la cycloïde en E *e*, puisque l'un et l'autre sont décrits par le point E; donc la ligne ou le rayon A E, qui est perpendiculaire à son cercle, sera

aussi perpendiculaire à la cycloïde en E. On le démontrerait de même dans tous les points de la cycloïde, et dans toutes les épicycloïdes comme celles de la fig. 2.

« VI. Après ces notions préliminaires, nous allons passer au principe général des démonstrations, qu'il faut concevoir aussi complétement avant que d'aller plus loin.

« Que le cercle M K, fig. 4, représente une roue qui n'a point de dents, et le petit cercle M N un pignon qui n'a point d'ailes; que la roue conduise le pignon par le simple contact de sa circonférence, de M en N, de manière que le pignon soit obligé de tourner avec la roue, chacun autour de son centre, comme on l'a vu dans l'article IV, au sujet du cercle A et du cercle C M D de la fig. 2 : il est clair qu'alors la circonférence du pignon aura exactement la même vitesse que celle de la roue, puisque chaque point de la roue fera passer un point du pignon, ce sera donc la plus grande vitesse que la roue puisse donner au pignon, car elle ne saurait lui donner une vitesse plus grande que la sienne propre ; il est sûr encore que la roue conduira le pignon avec la plus grande force dont elle est capable, car elle agira par un levier C M égal à son rayon, de façon que la puissance qui serait appliquée en Z pour faire tourner le pignon par le moyen de la roue ne saurait agir sur le point M par un levier plus court; d'ailleurs, elle agira suivant la direction M Q perpendiculaire au levier ou rayon P M du pignon, et il n'y a pas de direction plus favorable que celle perpendiculaire.

« Dans la supposition que nous venons de faire de la roue et du pignon, il n'y a point de frottement, parce que la roue et le pignon ne se touchent que dans un point, et que le même point de la roue ne parcourt pas différents points du pignon, ce qui serait nécessaire pour qu'il y eût frottement; ou, s'il y en a, il est le plus petit qui soit possible, parce que le moindre frottement est celui d'une surface frottante, dont la direction est parallèle à celle sur laquelle elle frotte; or la direction du mouvement de la roue qui se fait suivant la tangente M Q est la même que la direction du pignon. La force frottante est aussi la plus petite qu'il soit possible, puisqu'une roue qui doit agir toujours par sa circonférence ne peut agir que par son rayon, et toujours perpendiculairement à la ligne des centres.

« VII. Nous aurons donc satisfait à toutes les conditions de l'engrenage le plus parfait, si nous pouvons donner des dents à la roue M K, et des ailes au pignon M N, telles que lorsque les dents de la roue agiront sur les ailes du pignon, la force, la vitesse et la direction de la roue et du pignon en M restent les mêmes qu'elles étaient dans le cas (de simples disques unis) que nous venons de supposer, où l'action se faisait au point de contact M.

« VIII. Pour remplir cet objet, je regarde d'abord un des rayons P T, même fig. 4, comme une aile du pignon. Par le point d'attouchement M des deux circonférences, je lui tire une perpendiculaire R M S; du centre C de la roue je tire C R, et une ligne C S perpendiculaire sur la ligne R M S; je vais prouver que l'action du rayon C R pour conduire le point R du pignon sera la même que l'action du point M dans le cas de l'article VI pour conduire le rayon P M.

« IX. Si la puissance Z, au lieu d'agir par un bras de levier C M sur le point M, agissait

par un levier C V qui fût la moitié de C M, elle aurait le double d'avantage ; mais, si cet avantage double était appliqué au point X du pignon, tel que P X fût la moitié de P M, comme il y aurait au point X la moitié moins de force pour lever le poids Y, les choses resteraient dans le même état, et la puissance agirait avec la même force qu'auparavant sur le poids Y (nous avions déjà ébauché cette explication, art. 1322-23). (*Nota. L'épicycl. se trace aussi par des points espacés ; v. fig. 7, pl.* II.)

« Il en serait de même de la vitesse ; la puissance Z ne donnerait au point V que la moitié de sa vitesse, mais cette moitié appliquée au point X produirait une vitesse double sur le point M ; ainsi la vitesse du pignon serait encore la même que dans le cas de l'article VI.

« X. Dans le cas où la roue agit sur le point R du rayon P R, la ligne R M S étant perpendiculaire sur P R et sur C S, C S est le levier par lequel agit la roue ; et P R est le levier par lequel résistera le pignon ; car, que la force qui pousse le pignon soit placée en R, en M, en S, elle produira toujours le même effet : il n'y a que la distance C S au centre de la roue qui décide de son effort sur le pignon. (Ces observations supposent que l'on sait calculer l'effet des leviers, que nous avons expliqué dans nos articles précédents de mécanique.)

Toutes les fois que la ligne de direction R M S passera par le contact M du rayon *primitif* et de la roue *primitive* (sur la ligne des centres, ou dans les plans des deux axes), la ligne C S et la ligne P R seront dans le même rapport que C M et P M, car les triangles C M S, P M R seront *semblables*, puisque l'angle S M C est égal à l'angle P M R, qui lui est opposé par la pointe, et que les angles en S et en R sont droits ; ainsi les deux triangles étant *semblables* (de figure), leurs côtés homologues seront proportionnels, et l'on aura : C M est à P M, comme M S est à M R ; il y aura donc entre le levier d'action C S et le levier de résistance P R le même rapport qu'entre C M et P M ; il y aura donc une force et une vitesse égales à celles que l'on avait, art. VI, lorsque la roue entraînait le pignon par sa circonférence et par le simple contact en M.

« XI. Voici donc une proposition générale, et qui servira de fondement à tout ce que nous allons dire. Toutes les fois que la ligne M R, tirée du point de contact des deux circonférences perpendiculairement sur l'aile du pignon, passera au point R par où l'aile sera menée, le pignon, étant conduit par ce point-là, recevra de la roue la même force et la même vitesse que s'il eût été entraîné par le point M, c'est-à-dire que sa vitesse et sa force seront les plus grandes possibles ; ainsi, toutes les fois que l'aile d'un pignon sera conduite par la dent d'une roue, il faudra que la ligne tirée du point de contact des deux circonférences (primitives) au point de conduite ou d'attouchement (ou de menée) de l'aile et de la dent soit perpendiculaire sur l'aile et sur la dent (afin que la menée soit uniforme).

« XII. Pour appliquer ce principe au pignon qui serait composé de *fuseaux* infiniment déliés, tels que les points A, B, C, D, fig. 5, il faut se rappeler que la roue primitive M C, entraînant le pignon primitif M D par sa circonférence, un point D pris sur la circon-

férence de ce pignon décrira une épicycloïde C D E (art. IV) ; et que c'est une propriété essentielle de cette épicycloïde que la ligne M D, tirée du point de contact M au point décrivant D, *est toujours perpendiculaire à la courbe* (art. V). Donc, si l'on fait une dent qui ait la figure de la courbe C D E, elle conduira le point D suivant la condition de l'article précédent, c'est-à-dire que la ligne tirée du point de contact M au point de conduite sera toujours perpendiculaire à l'aile de la dent (c'est aussi le cas menée des pignons en lanternes, que nous avons déjà exposés, art. 1347 et suivants).

« XIII. Il est indifférent que la dent C E agisse seule sur le fuseau D, ou qu'il y ait en même temps plusieurs dents qui agissent sur plusieurs fuseaux, car chacun supportera une partie de l'effort qui aurait été réuni sur un seul, et le total de l'action de la roue sera le même qu'auparavant (1).

« XIV. Je viens maintenant à un autre cas qui est un peu plus compliqué, mais qui est aussi plus utile dans l'usage, et que l'on devrait employer presque toujours à cause de la facilité qu'il procure dans la pratique. Je suppose que l'aile du pignon C D, fig. 6, soit un plan rectiligne qui passe par le centre C du pignon, plan représenté par la ligne C D, fig. 6 ; il s'agit alors de déterminer la figure de la dent H D O qui doit conduire l'aile C D suivant les lois de l'engrenage parfait (ou avec une menée uniforme).

« On décrira un cercle C *d* D M dont le rayon soit la moitié de celui du pignon primitif (ou qui ait pour son diamètre le simple rayon primitif du pignon), et on imaginera ce cercle mobile autour du point O, qui est son centre, en sorte que la circonférence de la roue primitive M H entraîne tout à la fois la circonférence du pignon qui tourne sur le point C et la circonférence du petit cercle C *d* D M qui tourne sur le point O, ou que le petit cercle soit entraîné par le pignon (par la circonférence intérieure de celui-ci), ce qui revient au même; lorsque la roue principale aura décrit l'arc M H, le pignon primitif aura décrit l'arc M V, qui est précisément de la même longueur que M H, et le petit cercle aura décrit l'arc M D, qui est aussi égal à l'arc M H, puisque chaque point de la roue a été appliqué à chaque point correspondant du pignon et du petit cercle, et qu'il a passé autant de points de l'un que de l'autre.

« Dans ce mouvement du petit cercle autour du centre O, le point D du petit cercle décrira sur le plan de la roue une épicycle H D O (art. IV), et, comme il roule aussi dans le pignon, le même point D décrira sur la surface du pignon une ligne droite C D; or la ligne M D, tirée du point central M des deux circonférences, est perpendiculaire sur l'épicycloïde H D O (art. V) ; la même ligne M D est perpendiculaire sur D C, car l'angle M D C, étant formé dans un demi-cercle M D *d* C, est nécessairement droit ; ainsi la ligne tirée du point de contact M des deux circonférences primitives au point décrivant D (contact de l'aile et de la dent) sera tout à la fois perpendiculaire à l'aile et à la dent, ce qui satisfait aux conditions demandées; on a donc cette proposition générale : « Si l'aile

(1) L'action simultanée de plusieurs dents n'a pas lieu dans nos engrenages ordinaires, mais les géomètres mécaniciens ont en effet trouvé certaines formes de dentures qui permettent la simultanéité. V. *Traité élémentaire des machines par Hachette.*

« d'un pignon est un plan rectiligne dirigé vers le centre, la dent de la roue qui doit « conduire ce pignon, en ne prenant qu'à la ligne des centres, doit être une épicycloïde « engendrée sur la circonférence extérieure de la roue par la rotation d'un cercle dont le « diamètre soit la moitié de celui du pignon. »

« XV. Nous sommes en état maintenant de passer à une proposition encore plus générale, et de démontrer que l'engrenage aura toujours les conditions requises, si l'aile et la dent sont engendrées par la révolution d'un même cercle générateur, roulant au dedans du pignon primitif pour décrire l'aile, et sur l'extérieur de la roue primitive pour décrire la dent. On peut remarquer que cette condition a déjà eu lieu dans les art. XII et XIV, car, dans le premier cas (art. XII), le cercle du pignon à lanterne a roulé lui-même sur la roue pour décrire la dent; mais, pour décrire l'aile qui n'était qu'un point, il n'a pu rouler au dedans de lui-même que d'une quantité infiniment petite, c'est-à-dire *point du tout*.

« Dans le second cas (art. XIV), un même cercle a roulé dans l'intérieur du pignon pour y décrire une ligne droite, que nous supposions être l'aile du pignon, et il a roulé aussi sur la circonférence de la roue pour y décrire la dent.

« XVI. Prenons donc un cercle quelconque D M C, fig. 7, qui soit plus petit que le pignon A M E, et dont le centre F soit toujours fixé sur la ligne des centres F M ; le pignon tournant de M vers A et la roue de M vers B entraîneront le cercle générateur et le point décrivant de M vers D; alors le point D décrira une épicycloïde A D G sur la surface du pignon (au lieu d'une droite ou rayon, parce que le cercle a ici son diamètre plus petit que le rayon du pignon), et une autre épicycloïde B D H sur le plan qui porte la roue art. IV); or ces deux épicycloïdes se toucheront toujours en un point D, puisque le point décrivant engendre l'une et l'autre en même temps : car la ligne M D, tirée du point de contact M au point D, sera toujours perpendiculaire à l'une et à l'autre (art. V), puisque la ligne M D décrira dans chaque instant infiniment petit un arc de cercle dont le centre sera M, et qui fera une portion infiniment petite de chacune des courbes A D G, B D H. Ainsi, en donnant à l'aile du pignon la courbure A D G, et à la dent de la roue la figure B D H, on aura rempli toutes les conditions de l'engrenage parfait, qui se réduisent (art. XI) à ce que la ligne tirée du point de contact des circonférences primitives au point de conduite soit toujours perpendiculaire à l'aile et au point de menée de la dent.

« XVII. Si l'on considérait comme avantageux que l'aile du pignon fût convexe aussi bien que la dent, et en opposant ces deux convexités l'une à l'autre, il faudrait que le cercle générateur fût d'un diamètre plus grand que le rayon du pignon, afin que l'aile fût convexe du côté de la roue, comme on le voit dans la fig. 8, où M B est la roue, M A le pignon, M D le cercle générateur qui a décrit au delà de la circonférence de la roue la dent B D et en dedans du pignon l'aile convexe A D ; mais il sera toujours plus commode de faire de l'aile A D une ligne droite, comme nous l'avons déjà dit.

« On a pu remarquer jusqu'à présent que la roue ayant conduit le pignon toujours en commençant sur la ligne des centres, l'engrenage a toujours été établi en saillie sur la

circonférence de la roue primitive, ce qui a augmenté la roue de la longueur d'une ogive, et que l'action sur le rayon primitif du pignon y a pénétré de la quantité de l'engrenage (et, en apparence, a réduit le pignon de cette même quantité).

« XVIII. Examinons maintenant ce qui doit arriver lorsque la roue conduira l'aile avant la ligne des centres; ce sera exactement le contraire de ce qui a été dit, c'est-à-dire que le *rayon d'action* du pignon sera augmenté, et le *rayon d'action* de la roue diminué de la quantité de l'engrenage. Pour connaître la figure que l'aile devra avoir, on considérera que, si l'aile qui est conduite par la dent avant la ligne des centres venait à retourner en arrière pour conduire à son tour la dent, les mêmes courbures de l'aile et de la dent continueraient à donner un engrenage parfait (mais seulement sous le rapport de son action perpendiculaire, et sauf que l'aile conduirait la dent avant la ligne des centres et en arc-boutant, ce qui produirait un frottement désavantageux).

« Nous devons donc transporter à l'aile ce que nous avons dit jusqu'ici de la dent qui conduit l'aile avant la ligne des centres, c'est-à-dire qu'une courbe du même genre devra être produite extérieurement sur la circonférence primitive du pignon pour ajouter à l'aile une portion d'ogive, au moyen d'un cercle générateur roulant extérieurement sur le pignon, pour en tracer l'ogive, et au dedans de la roue pour y tracer le flanc de la dent, lequel flanc conduira l'ogive du pignon; cette ogive ou épicycloïde de l'aile du pignon devra être décrite par la révolution d'un cercle qui ait pour diamètre le rayon primitif de la roue et roulera au dedans de la circonférence primitive de cette roue, pendant qu'il se développera en même temps sur la circonférence extérieure primitive du pignon (on doit se rappeler que nous en avons fait l'observation en indiquant l'augmentation de grosseur exigée pour le pignon menant une roue, augmentation produite par l'ogive que prend alors le pignon menant, v. notre art. 1338).

« XIX. Nous pouvons actuellement trouver quelles seront les figures de l'aile et de la dent, lorsque la dent devra conduire l'aile avant et après la ligne des centres, comme il arrive avec les pignons au-dessous de 10 ailes. Pour cela, nous réunirons les deux cas précédents, et nous donnerons à l'aile et à la dent les deux courbes qui leur conviennent, l'une à l'aile et qui ne devra servir qu'*avant* la ligne des centres, et l'autre à la dent et qui sera destinée à conduire ou à être conduite seulement *après* cette ligne des centres.

« La circonférence L F, fig. 9, est celle de la roue *primitive;* la circonférence O *o* est celle du pignon *primitif;* l'aile du pignon est *s o m* ou S O M ; la dent de la roue est *p l k* ou P L K; chacune est composée de deux parties : pour la roue, ce sont : 1° la portion *l k* de la dent rentrante dans la roue primitive, qui conduit avant la ligne des centres la portion saillante *o m* de l'aile dépassant son pignon primitif; 2° la portion saillante *l p* de la même dent, et qui conduit la partie rentrante *o s* du pignon après la ligne des centres; pour le pignon, ce sont : 1° la portion saillante ou arrondie *l m* du pignon, conduite avant le centre par le flanc *l k* de la dent, et 2° la portion rentrante ou le flanc *o s* du pignon, qui est conduit après le centre par la partie *l p* de la roue saillante au delà de sa circonférence primitive. C'est donc avant la ligne des centres que le pignon fournit sa partie saillante pour l'engrenage, et c'est après la ligne des centres que la roue agit par

sa partie saillante sur le flanc de l'aile. Dans la ligne même des centres, on peut dire que ce n'est ni l'un ni l'autre, puisque l'aile et la dent se touchent en A par le même point de leur circonférence primitive. La portion droite du centre et rentrante *l k*, ou le flanc de la dent, sera tracée par un cercle générateur ayant pour diamètre le rayon primitif de la roue roulant sur le pignon primitif pour décrire son ogive extérieure, et en même temps au dedans de la roue primitive pour décrire le flanc droit au centre de sa dent. La portion rentrante, ou flanc de l'aile du pignon, sera aussi tracée droit au centre (comme un rayon) par le point décrivant de son cercle générateur, ayant pour diamètre le rayon primitif du pignon et roulant dans l'intérieur du pignon; tandis que ce même cercle générateur, se déroulant aussi sur la circonférence primitive de la roue, y tracera l'épicycloïde de sa dent, le tout comme il a été indiqué précédemment (ce qui est dit ici d'un seul côté des dents et des ailes doit s'entendre aussi de leurs côtés opposés, auxquels on donne la même figure, afin que le rouage puisse aisément rétrograder, ainsi que le besoin s'en présente quelquefois).

« XX. Ce que nous avons appelé jusqu'à présent roue primitive et pignon primitif doit être entendu de deux cercles (ou disques à bords unis et sans dents) dont les diamètres seraient entre eux exactement comme le nombre des dents est au nombre des ailes. Je suppose que C et P, fig. 4, soient les centres d'une roue de 30 dents et d'un pignon de 10 ailes, tous deux sans dents et se conduisant par le seul contact; il est clair que le pignon doit faire trois tours pour chaque tour de la roue; il doit donc avoir une circonférence et un diamètre qui soient le tiers de ceux de la roue; ainsi l'on divisera la ligne C P en quatre parties; une de ces parties, P M, sera le rayon primitif du pignon, et le reste, C M, sera le rayon primitif de la roue; ce seront là le pignon *primitif* et la roue *primitive* (*les seuls susceptibles du même rapport que leurs nombres*).

« Quoique les articles précédents aient traité de la menée qui commence avant la ligne des centres, il n'en est pas moins vrai qu'on la doit éviter autant qu'il est possible, parce qu'il se fait un frottement à contre-sens et une espèce d'arc-boutement, lorsque l'aile et la dent rentrent l'une contre l'autre, frottement qui est toujours beaucoup plus résistant que celui qui se fait dans le dégagement et la fuite d'une dent; d'ailleurs, toutes les matières hétérogènes qui sont repoussées et chassées hors du pignon par ce dernier mouvement sortant sont au contraire ramenées et engagées par le mouvement rentrant qui a lieu avant la ligne des centres.

« Mais on n'est pas toujours maître de faire commencer la conduite de chaque aile précisément dans la ligne des centres : si le pignon est peu nombré, comme est un pignon de 9 ou 8 ailes ou au-dessous, la roue prendra nécessairement avant la ligne des centres, surtout si on laisse aux ailes du pignon la grosseur et la solidité convenables. La fig. 10 représente dans le bas trois ailes d'un pignon de 8 dont les faces droites (les flancs) sont D A, D B, D C; je suppose que le diamètre primitif de la roue soit 5 fois plus grand que celui du pignon, elle devra donc avoir 5 fois plus de dents, c'est-à-dire 40; ainsi chaque dent, avec l'intervalle qui lui répond, occupera 9°, parce que la 40° partie de 360° est 9°. On prendra donc l'arc B E de 9° et avec un cercle générateur dont le diamètre sera égal

à B D, on décrira une portion d'épicycloïde, E G, qui aille toucher en G l'aile D A ; on lui ajoutera une autre partie semblable G H ; mais alors il ne restera que B H pour le vide des dents et pour la grosseur de l'aile (sans compter un peu de jeu ou d'ébat qu'il y faut encore) ; l'aile deviendrait donc trop faible, parce qu'il est nécessaire dans la pratique de faire le vide au moins égal au plein, et la largeur de l'aile (à peu près) égale à celle de la dent, et même un peu plus grande, si c'est le pignon qui conduit : il faudra donc interrompre la dent en F et lui donner la portion semblable F K, de façon que E K soit au moins égal à K B, c'est-à-dire que le vide de la denture soit au moins égal au plein, et faire la largeur de l'aile presque égale à B K ; mais alors l'extrémité F de la dent cessera de toucher l'aile D A avant que la dent suivante B L se trouve atteindre la ligne des centres ; la dent suivante B L aura donc dû prendre l'aile D B avant la ligne des centres, comme avec tous les pignons moindres que 10. (*Nota. Notre art.* 1272 *résume toutes ces règles et les suivantes pour l'engrenage.*)

« XXI. Il reste à parler de l'engrenage des roues de champ ou à couronne, soit que la roue doive mener le pignon, soit qu'elle ait à être menée par lui.

« Il est nécessaire de considérer la circonférence de la roue, dans l'endroit où elle agit, comme une ligne droite perpendiculaire à l'axe du pignon, et de supposer que la dent qui agit sur l'aile est mue dans un plan perpendiculaire à l'axe du pignon, comme si c'était une crémaillère droite ou une règle dentée.

« Il est vrai que cette supposition s'écarte du vrai, surtout si chaque aile du pignon est conduite un peu loin, c'est-à-dire si le pignon est peu nombré, parce que le point de conduite sera un peu plus près du centre de la roue, vers la fin de la menée, qu'il ne serait si la denture était sur un plan rectiligne. Cette différence sera presque égale au *sinus verse* de l'arc décrit par la roue depuis la ligne des centres jusqu'à la fin de la conduite (et qui peut être fort petit). Il en résultera donc un petit frottement dans le sens de l'axe du pignon ; mais il n'est guère possible d'y avoir égard, même dans la théorie, sans une complication de calculs dont on tirerait peu d'avantage dans la pratique. (*La fig.* 7, *pl.* XXXVIII, *est l'engrenage d'angle ou de champ de la grosse mécanique.*)

« Supposons donc une ligne droite C A, fig. 1 et 3, mobile de A vers C et qui fait mouvoir un cercle A autour de son centre S ; on comprend, par ce qui a été dit (art. I et IV), que ce cercle aura décrit, par son point E, sur le plan qu'on suppose s'être mû avec cette ligne, une *cycloïde simple* C E D ; et que, à chaque point d'avancement du cercle, la ligne tirée de son point de contact sur la base au point décrivant aura été toujours perpendiculaire à chaque point de cette cycloïde.

« Si l'on veut donner à la ligne C F A des dents au moyen desquelles elle puisse conduire le pignon que représente le cercle A par un point A de sa circonférence, considéré comme un fuseau infiniment délié, il faudra donner à ces dents la figure d'une portion de cycloïde A K, fig. 3. On concevra de même que, si la ligne M N, fig. 10, représente une portion de la circonférence primitive de la roue de champ, qui doit conduire un pignon dont les ailes O R D, etc., sont des rayons du pignon, les dents de cette roue

devront être des portions de cycloïde O P, etc., décrites par la révolution d'un cercle dont le diamètre entier soit égal à O D roulant sur la ligne M O N.

« En effet, on doit dire dans ce cas-ci tout ce qui a été dit dans les autres, et surtout dans la proposition générale (art. XV), c'est-à-dire que le même cercle doit rouler au dedans du pignon O S, fig. 10, pour décrire l'aile O R, et sur M O N, pour décrire l'ogive de la dent O P; la ligne droite peut être considérée comme une portion de cercle dont le rayon est infini, etc. (1). » *V. dans Lepaute l'ensemble de ces articles abrégés ici*

ANCIENNE DENTURE DE LÉPINE, dite improprement *denture à rochet.*

1359. *Lépine* n'a rien publié sur ce sujet ; on est réduit, à cet égard, aux conjectures probables tirées de l'examen de sa denture. Un côté de sa dent porte le flanc et la demi-ogive ordinaire, l'autre côté est supprimé par une courbe concave qui, depuis la pointe d'ogive, va s'amortir au pied du flanc de la dent suivante. La pointe d'ogive est hors du centre de la largeur d'une dent ordinaire : en laissant ainsi à la courbe ogive plus d'étendue en largeur, et par suite un peu plus de hauteur, il en résulte que celle-ci peut mener l'aile un peu plus longtemps; il paraît que l'auteur a voulu par là éviter pour la dent suivante sa partie de menée avant la ligne des centres, inévitable avec les pignons ordinaires de bas nombre. Dans ce cas, il eût mieux valu employer des pignons de 10, avec la condition *connue* du plein des dents et de la maigreur des ailes ; ses roues et ses pignons eussent été plus nombrés d'un quart en sus, avec dents et ailes d'autant plus fines; et c'est ce que *Lépine* paraît avoir redouté par habitude. On voit que cette denture est bien différente de celle d'un vrai rochet.

Huyghens avait commencé à tirer l'horlogerie du chaos de l'industrie ignorante et tâtonneuse : il voulait en faire une science; mais il mourut trop tôt pour en perfectionner les dentures au moyen de l'épicycloïde, qu'il avait si savamment employée ailleurs. Les démonstrations de la géométrie, sollicitées par la mécanique, n'étaient pas assez connues dans l'horlogerie ; les outils à diviser, tailler, arrondir les dents, n'ont existé que plus tard ; on cherchait, on ne trouvait rien, parce qu'on n'était pas sur la voie. On commença par employer des pignons, faits à la main, de 5 ailes et de 6, plus faciles à exécuter, menés par des dentures plus grosses et plus faciles aussi à arrondir à la main. On croyait simplifier l'engrenage, et l'on en augmentait les frottements. On s'attacha ensuite aux pignons de 7, on attribua même quelque qualité occulte à leur nombre *impair* : la difficulté d'en mesurer le diamètre amena l'usage des pignons de 8 ; on disputait alors sur les nombres *rentrants*. On n'osait presque pas arriver à l'usage du pignon de 10, que l'on n'a généralement placé, dans ces derniers temps, qu'à la roue du centre, où il convient le moins. On continuait à redouter la finesse des dentures, lors même que l'on avait des

(1) Ce sujet semble demander un complément qui manque ici pour le cas où le pignon mène la crémaillère; mais, les crémaillères droites étant peu employées en horlogerie, nous renverrons à cet égard au *Traité des machines de Hachette*, p. 201, et à d'autres auteurs en ce genre, où l'on trouvera que les mêmes principes des crémaillères s'appliquent aux *vis sans fin*, aux *cames*, etc.

outils qui la facilitaient. Cependant on a vu des ouvrages soignés, mais en petit nombre, où, pour l'usage ordinaire, on avait employé partout le pignon de 10, et même jusqu'à l'engrenage de roue de champ avec le pignon de roue de rencontre. Mais depuis, dans la haute horlogerie marine, on a employé des pignons de 16, 20 ailes, et même plus. Nous avons nous-même fait exécuter, il y a quelques années, un calibre de Montre civile où tous les pignons sont de 12, celui d'échappement compris ; mais il est vrai que les pignons, les dentures et les engrenages y doivent être soignés à proportion.

Pour en revenir à Lépine, il ne fit que peu de pièces suivant sa première méthode; et la difficulté de renouveler des limes et fraises faites exprès le ramena bientôt à la forme ordinaire. Ses Montres n'en furent pas moins parfaitement traitées. On sait que sa fabrique était à *Ferney-Voltaire*, et son dépôt principal à Paris. Cet habile artiste, n'étant ni ambitieux ni charlatan, a fait peu de bruit; néanmoins ses ouvrages recherchés lui procurèrent une belle fortune, et l'on dit qu'il laissa 40,000 livres de rente à son fils. Son établissement à Paris, place des *Victoires*, a toujours été renommé et l'est encore, ayant soutenu plusieurs successeurs. C'est tout ce que nous avions à dire sur l'engrenage de *Lépine*, qui, ne se pratiquant plus qu'à ses crémaillères de répétition dont il rend le poussoir fort doux, n'a pas besoin, avec cette explication, d'autres figures que celles de notre planche X du tome Ier de cet ouvrage.

DE LA DENTURE HÉLICOÏDE DE WHITE.

1360. Il ne nous reste plus à citer que l'engrenage dit incliné, et mieux *hélicoïde*, du mécanicien anglais *James White*, qui en publia un Mémoire théorique en 1812 chez *Colas*, imprimeur, rue du Vieux-Colombier, 26.

Nous ne rapporterons pas ici les détails et calculs de ce Mémoire, qui allongeraient trop cet article, mais nous transcrirons textuellement les propriétés suivantes, que l'auteur attribue à sa méthode :

« 1° Que l'action exercée par une roue de l'espèce que l'on verra ci-après sur une autre avec laquelle elle engrène est la même à chaque instant ; de sorte que le moindre mouvement de l'une communique un mouvement *semblable* à l'autre.

« 2° Qu'il n'y a que deux points, un dans chaque roue, qui se touchent nécessairement en même temps ; et que leur contact se fera toujours *infiniment* près du plan des axes, si les diamètres des roues, pris dans ces points mêmes, sont en raison exacte du nombre de leurs dents ; auquel cas il n'y aura *aucun frottement* entre les points se touchant.

« 3° Que l'emploi prolongé de cet engrenage suffit seul pour amener cet état des choses ; les dents, de forme quelconque, étant sujettes à s'*user dans tout autre état*, et ne s'usant plus *sensiblement*, dès que leur contact se fait infiniment près du plan des axes, et dans la tangente commune.

« 4° Qu'en conséquence, on peut se dispenser des soins que l'on prend d'ordinaire pour donner aux dents la forme épicycloïdale ; qu'on peut même leur donner plusieurs formes sans détruire le principe de la constance des mouvements ; et, enfin, que toutes

les formes se *réduiront, par le travail, à la même*; savoir : une forme angulaire plus ou moins émoussée, selon la dureté ou la mollesse de la matière dont les roues seront composées.

Nous reproduisons sur la pl. XXXIX, fig. 13, celle même de l'auteur, pour donner un aperçu de sa méthode. On pourra voir le reste sur la planche qui accompagne son mémoire.

« En creusant, dit-il, sur le limbe, ou même sur la surface cylindrique d'une roue B C, « des dents hélicoïdes comme *a c, b d,* dont l'inclinaison soit telle que la surface menée « d'une dent *a c* ne quitte la ligne des centres qu'après que la surface semblable de la « dent suivante *b d* y est arrivée, on aura divisé la roue en un nombre infini de dents « (suiv. *Camus*, qui, dit-il avec raison, a si bien traité cette matière), ou du moins en « un nombre plus grand que sur son simple contour circulaire. » L'auteur démontre sa proposition dans une autre figure, par la comparaison de l'excès de la ligne diagonale d'un carré sur l'un de ses côtés. Il borne l'inclinaison moyenne de sa denture à 15° et prévient que la poussée dans le sens des axes, provenant de cette inclinaison, doit être appuyée d'un côté de chaque roue sur une contre-plaque au bout du pivot, pour supprimer le frottement de sa portée. Après divers développements, l'auteur arrive à ce paragraphe définitif, suivant lui, pour décider la question : « J'ai fait tourner deux « roues de cette espèce pendant plusieurs semaines avec une vitesse et sous une pression « considérables, en les humectant sans cesse d'huile chargée d'émeri, l'une des sub- « stances que l'on connaisse les plus propres à les détruire. Eh bien, après cette rude « épreuve, la destruction des dents à l'endroit des cercles primitifs a été trouvée *imper- « ceptible.* »

1361. Nous ne contestons pas les conséquences *théoriques* que l'auteur déduit de sa méthode, qui nous a séduit d'abord comme bien d'autres et que nous avons éprouvée nous-même en y portant toute la précision voulue d'exécution, mais nous devons prévenir que plus tard l'expérience, plus sûre que toutes les raisons, nous a forcé de penser autrement. Nous avons connu White et nous nous sommes entretenu avec lui sur sa méthode, dans ses ateliers de l'hôtel Bretonvilliers que le ministre lui avait concédé. En lui parlant un jour de la poussée de ses roues dans le sens des axes, il nous vint l'idée, dont nous lui fîmes part, de tailler par une double denture ces roues, dont une moitié de l'épaisseur serait inclinée dans un sens contraire à l'autre. White nous fit voir à l'instant dans un coin de l'atelier une roue toute faite de ce genre, celle peut-être dont il est question dans son Mémoire, et nous nous félicitions de nous être rencontré avec cet habile artiste, lorsque nous fîmes la triste réflexion que c'était aussi le moyen de porter presque au double le poids et l'inertie des mobiles.

Voulant, pour essai, adapter l'engrenage de White à un tour universel, nous avons exécuté nous-même la taille d'une roue et d'un pignon d'acier fondu, suivant les proportions de l'auteur, sur un outil à plate-forme fait exprès pour cette méthode dans les ateliers de M. Farcot, habile mécanicien à Paris, appuyé que nous étions, pour sûreté, sur les avis d'un ancien contre-maître de White; et, pour garantir les deux pièces d'acier

de toute erreur, nous nous préparâmes par la taille de plus d'une vingtaine de roues et pignons de même grandeur en fer, en laiton, etc., le tout sous les yeux de M. Farcot; enfin nous ne taillâmes définitivement les deux mobiles d'acier qu'après nous être assuré de la complète disposition de l'instrument.

1362. Nous avons éprouvé cet engrenage assez longtemps pour nous assurer qu'il usait même la ligne normale des diamètres primitifs, moins peut-être que ne l'aurait fait un engrenage ordinaire, mais assez distinctement pour nous persuader que cet effet devait continuer indéfiniment; la pression était néanmoins modérée.

1363. Nous avons aussi eu sous les yeux une autre expérience à l'égard des pressions légères dans l'échappement d'une Montre marine à *ancre* et à *fourchette*, où la communication de celle-ci avec le bras du balancier était établie avec les plus grands soins sur le système de White, au moyen d'un outil construit exprès, et suivant les conseils de l'auteur; les parties en action étaient d'un côté en rubis, et de l'autre en acier trempé dans tout son dur, l'un et l'autre parfaitement polis, et opérant sans huile. La marche de cette Montre eut d'abord une régularité fort remarquable pendant le premier mois; le second mois laissa apercevoir des variations croissantes; et pendant le troisième mois la marche devint tellement irrégulière, que la Montre se trouvait hors de service pour les observations. On nettoya avec le plus grand soin les seules parties du système de White, et la marche reprit sa première régularité pendant un mois, avec les mêmes écarts dans les mois suivants. La même expérience, continuée pendant une année entière, nécessita la substitution d'un échappement ordinaire à celui du système de White, qui semblait manifester un effet de collement et d'adhérence, à la longue, entre les parties en contact. Cette méthode nous paraît peu avantageuse dans l'horlogerie, où elle ne pourrait guère s'appliquer qu'à des premiers mobiles et nullement aux derniers. Nous pensons néanmoins que, sous des pressions moyennes et avec un choix judicieux des métaux en contact, cette méthode peut réduire avec quelque avantage les frottements et l'usure dans les machines à filature et autres analogues. Mais, dans les expériences citées, nous trouvons un motif de présumer qu'elle ne comporte pas toute la perfection ni la généralité promises par la théorie, et qu'on pourrait parvenir à en démontrer la cause (1).

(1) Malgré l'avantage d'un local vaste et gratuit, l'invention ingénieuse de White ne lui fut pas fructueuse en France, où l'on s'occupait moins de machines qu'aujourd'hui. Il retourna en Angleterre, où il n'obtint pas une meilleure fortune. Il nous a été rapporté que, pour convaincre ses compatriotes incrédules, et rendre palpables aux ignorants les avantages de son système, il y fit mouler en sucre cristallisé des mobiles suivant la méthode héliçoïde, et suivant l'ancienne méthode épicycloïdale, dont le résultat de comparaison était la réduction rapide de ces derniers en poussière, tandis que le nouveau indiquait très-peu de destruction; mais que de riches propriétaires de modèles suivant l'ancienne méthode cabalèrent contre le pauvre auteur qui mourut de chagrin et de misère!!!

Le contre-maître intelligent dont nous avons parlé ci-dessus avait dirigé l'exécution de la plate-forme de M. Farcot, après en avoir précédemment exécuté une de proportion propre à la pendule, pour un amateur. On doit penser que celle-ci, faite sous les yeux et par les ordres de James White, devait comporter toutes les conditions convenables au système de l'inventeur, et que le contre-maître expérimenté a dû les établir également dans la seconde pour M. Farcot. Du reste, nous ne rapportons pas nos propres expériences comme une démonstration, mais comme un avertissement.

CHAPITRE V

TRAITANT D'ABORD DE PLUSIEURS SUPPLÉMENTS AUX ARTICLES DE L'ENGRENAGE, PUIS DU CALCUL DES ROUAGES,

SUIVIS DES ART. DES ÉCHAP. ACTUELS A REPOS ET DES ÉCHAP. LIBRES (1).

1364. On n'a pas parlé, dans les articles qui précèdent, d'une petite difficulté que quelques praticiens trouvent dans la mesure des roues et pignons de minuterie (déjà signalée dans les articles 68 et 69, avec note à la fin (2), parce que sa solution n'est qu'une conséquence simple, directe et facile de nos aphorismes, et des développements à la suite. Pour compléter ici la matière, nous rappellerons ce que nous en avons déjà dit ailleurs.

1365. Il s'agit de proportionner deux engrenages de révolutions et nombres différents sur une seule et même distance des centres. On sait déjà que, dans la disposition la plus commune, si la chaussée de minuterie a son pignon de 12 ailes, la roue de renvoi a 36 dents, et que, si la chaussée n'a que 10 ailes, la roue est de 30 ; qu'il suffit que la chaussée fasse 3 tours pour un de la roue de renvoi qu'elle mène, et qu'alors le pignon de renvoi fasse 4 tours pour un de la roue menée de *canon* ou d'heure, qui, par ce moyen, ne fait qu'un tour pour 12 de la chaussée.

1366. Il faut donc d'abord tirer sur le calibre une ligne des centres, ou de jonction, entre les deux centres donnés ou fixés, puis, pour le premier engrenage de chaussée, diviser la distance des centres en 4 parties égales, dont une sera le rayon primitif du pignon, et dont les trois autres parties restantes formeront le rayon primitif de la roue de renvoi. On en tracera sur le calibre les circonférences primitives, qui se toucheront simplement sans enjamber l'une sur l'autre.

(1) Ayant encore à publier sur l'engrenage deux planches qui intéressent la mécanique et la théorie générale, nous sommes forcé de reporter à quelques pages plus loin le sujet des échappements actuels, qui ne peuvent être traités sans planches. Nous en prenons occasion de compléter utilement les articles précédents, et d'y joindre ceux du calcul des rouages, qui devaient toujours être donnés, et qui viennent plus naturellement se placer ici, vu que la plupart de ces articles n'exigent pas de figures

(2) Nous ajouterons, comme suite de la note rappelée ici, que nous avons toujours eu peine à concevoir qu'un praticien, fier d'une sorte de réputation, comme établisseur formant des élèves, et d'un caractère assez difficile (il est décédé), ait pu nous demander deux fois de suite de lui tracer la grandeur de ses mobiles de minuterie, parce que les nombres donnés différaient de ceux ordinaires, et cela après avoir pris, raisonné, tracé ces mesures sous ses yeux, et lui en avoir remis une instruction écrite, simple et générale. Il serait encore difficile d'expliquer comment un artiste plus renommé a pu emprunter de ce même praticien le calibre de ses régulateurs astronomiques à long pendule, si l'on ignorait que l'emprunteur, avec toute sa réputation, ne savait pas composer une telle pièce, après s'y être appliqué avec prétention, mais peu de succès. Il y a des gens qui s'habituent à employer le talent d'autrui pour s'en prévaloir si la composition réussit, afin de pouvoir alléguer, dans le cas contraire, que, n'ayant pas eu le temps de s'en occuper personnellement, ils s'en sont malheureusement rapportés à tel ouvrier, qui n'a pas su s'en tirer !!! Puis adoptez aveuglément des éloges exagérés ou de fausses préventions, car *voilà justement comme on écrit l'histoire :* sans connaissance suffisante du sujet.

Une opération semblable aura lieu pour le second engrenage du pignon de 8 (le plus ordinaire) avec la roue de canon de 32 : on divisera de nouveau la même distance des centres en 5 parties, dont une sera le rayon primitif du pignon de 8 et les quatre autres formeront le rayon primitif de la roue de canon, et l'on tracera aussi leurs circonférences primitives.

1367. Pour avoir les grosseurs totales des deux pignons qui mènent ici, on ajoutera au rayon primitif du pignon de 12 le 1/4 dudit rayon, et à celui du pignon de 8 les 6/7es de son rayon primitif; ce qui peut servir à la règle proportionnelle des autres nombres intermédiaires des pignons qui mènent : on trouvera cette proportion à peu près indiquée aux pignons de la pl. XXXIV, où elle est marquée au pointillé. Nous disons à peu près, parce que, si l'on traçait en grand ces engrenages de pignons menants, les ailes y étant plus larges, les excédants seraient encore plus saillants (suivant la 1re mesure ci-dessus, pour 12 et 8 ailes), mais celle pointillée suffit pour les mobiles très-libres d'une minuterie. Du reste, quand la pointe des ailes gêne aux rentrées, on sait qu'il est permis d'en retrancher une bonne partie de ce qui ne mène pas. Il n'est pas ici question de pignons menants de 6 ni de 7, dont la partie d'ogive nécessaire pour mener uniformément ne pourrait opérer sa rentrée. On peut d'ailleurs employer dans une minuterie des nombres différents, puisqu'on le fait pour la Pendule. Quant à l'excédant des roues menées, il est en demi-cercle, et saillant de la moitié de la largeur d'une dent; on laisse un peu plus, pour amener la roue à sa vraie proportion sur l'outil à arrondir, jusqu'à ce que l'engrenage soit libre. On tracera donc aussi conséquemment la circonférence de ces excédants sur le calibre.

1368. Nous ajouterons ici, comme supplément au dernier paragraphe de Lalande sur l'*engrenage* d'une roue et d'une crémaillère, ce qui est dit à ce sujet dans le *Traité des machines*, par Hachette, instructeur de l'École impériale polytechnique; cet article, que nous rapportons textuellement, et qui se trouve sans démonstration, paraît aussi pouvoir s'appliquer aux vis sans fin. (Voy. la fig. 14, pl. XXXIX.)

De l'engrenage d'une roue et d'une crémaillère comprises entre deux plans parallèles.

« La roue tourne autour d'un axe passant par son centre A; un plan perpendiculaire « à cet axe contient le cercle du rayon primitif A C de la roue; la droite T C E' D', qui se « meut en même temps que la crémaillère dont elle est la ligne milieu, touche constam- « ment le cercle du rayon A C au point C, en sorte que la vitesse du point C est la même, « soit qu'on regarde ce point comme appartenant à la roue, ou comme fixé à la crémail- « lère. Cette droite T C E' D', pouvant être considérée comme un cercle d'une roue dont « le rayon primitif est *infini*, l'engrenage d'une roue et d'une crémaillère est un cas « particulier du cas plus général où les deux roues ont des rayons primitifs de dimen- « sions finies.

« Faisant tourner le cercle du diamètre A C sur la droite T C E' D', le point C du cercle « engendre, non pas une épicycloïde comme dans le cas général des deux roues, mais « une cycloïde (simple) C M. On prend pour la demi-épaisseur d'une dent de la cré-

« maillère une droite C N contenue un nombre entier de fois dans le cercle du rayon « A C ; une perpendiculaire N M à la droite C T détermine la grandeur de l'arc C M de la « cycloïde. La perpendiculaire M s au rayon A C rencontre la circonférence du dia- « mètre A C au point *s*; faisant A Q = A *s*, C Q est la grandeur du flanc de la roue qui « correspond à l'arc de cycloïde C M. Le creux de la dent de cette roue est terminé par la « courbe M Z R Q, que décrit le point M de la crémaillère sur le plan du cercle dont le « rayon est A C. On suit, pour construire cette courbe, la méthode qui a été décrite à « l'art. 54 de Hachette. On prend ici l'arc C N' du rayon A C, égal en longueur à la « droite C N, épaisseur (largeur) d'une demi-dent de la crémaillère, et on tire le rayon « A Z N'; les deux arcs N' Y et C N' étant égaux, on mène le rayon A Y, et Q R Z X est le « creux de la dent de la roue; C Q, X Y sont les flancs des deux dents adjacentes à ce « creux. Cette figure C Q R Z M X Y a été transportée en D V G K E. Pour compléter « la dent de la roue, on considérera la ligne milieu D T de la crémaillère comme « l'axe du pilon R S dans la figure précédente (où il s'agissait des cames d'un pilon). « La courbe D *d* développante du cercle du rayon A C conduira la crémaillère de la « même manière que la came *v x* conduit le pilon. Le point *d* est l'intersection de la « développante D *d* et d'un rayon A δ D, tel que l'arc D δ est de même longueur que la « droite C N.

« La crémaillère porte des dents, et deux dents consécutives sont séparées par un creux, « mais elle n'a point de flancs, ou autrement le flanc se réduit à une ligne droite (comme « on l'a déjà vu à l'art. 60 des cames et pilons). On aura donc tout ce qui est relatif à « l'engrenage d'une crémaillère et d'une roue lorsqu'on connaîtra la forme du creux qui « sépare deux dents consécutives de la crémaillère ; ce creux est terminé par deux « branches de courbes égales à E' H'. Cette branche de courbe est égale à celle qui est « décrite d'un mouvement relatif par l'extrémité M' de la dent de la roue sur la crémail- « lère. On construit cette courbe (inutile dans l'horlogerie) d'après ce qui a été dit (art. 54 « de Hachette), et il suit de l'art. 55 (id.) que le rayon A C touche à la fois la dévelop- « pante du cercle C M et la cycloïde rallongée C R' Z'. »

1369. Aucun des auteurs que nous avons sous la main ne donne la mesure des excédants pour l'engrenage d'une crémaillère droite, ou d'une vis sans fin avec une roue. Hachette est le seul que nous sachions en avoir dit le peu que nous venons de rapporter. Suivant cet auteur, quand la crémaillère droite mène une roue ou un pignon, l'excédant des dents de cette crémaillère doit être une simple cycloïde tracée par un point d'un cercle générateur ayant pour diamètre le rayon de la roue ou du pignon menés, et lors de son développement, ici sur la base droite de la crémaillère, ce qui produit une simple cycloïde pour les excédants de la crémaillère. Mais, quand, au contraire, c'est la roue ou le pignon qui mène la crémaillère droite, l'excédant des dents de la roue ou du pignon menants n'est ni une cycloïde ni une épicycloïde, mais une *développante* du même cercle générateur ci-dessus, ayant toujours, comme on l'a vu, pour diamètre le rayon de la roue ou pignon menants. C'est à l'égard de ce cercle générateur que la ligne droite, milieu de la crémaillère, devient *osculatrice*, et que son premier point de contact décrit la *dévelop-*

pante s'écartant de plus en plus du même cercle générateur : autrement celui-ci serait à considérer comme ayant pour diamètre le rayon du mobile mené, qui est la crémaillère supposée avoir un rayon infini; alors ces deux circonférences équivaudraient sous ce rapport à des droites, ou des cercles de rayons infinis.

1370. Nous avions donné par anticipation, dans la pl. II du 1er vol., les figures 7 et 18 relatives à la courbe employée par *Huyghens* pour l'isochronisme des oscillations de son pendule. C'est cette courbe qui est revenue nous prêter son secours pour l'engrenage parfait ou uniforme, et qui nous a encore appris à la remplacer comme approximation par une portion de cercle d'un diamètre approprié; cette courbe précieuse et singulière mérite bien d'être connue plus complétement des artistes et amateurs de l'art, malgré toutes les préventions de la pratique vulgaire. Nous avions différé les développements intéressants de ce sujet comme trop compliqués pour une introduction et au début de cet ouvrage; mais nous saisissons cette occasion de les rétablir ici comme supplément à la notice de *Lalande* que nous venons de rapporter quelques pages plus haut, et nous expliquerons premièrement, en détail, les deux figures 7 et 18 citées ci-dessus.

1371. C'est à la suite de sa première méthode de tracer la cycloïde (voyez la fig. 5, pl. II) que le savant *Huyghens* s'exprime comme il suit :

« On pourra encore tracer la cycloïde autrement, c'est-à-dire par des points trouvés « (et espacés) : soit décrit, fig. 7, pl. II, un cercle A F B K dont le diamètre A B soit « égal à la *moitié de la longueur* du pendule ; sur sa circonférence, soient prises de chaque « côté, depuis A, autant que l'on voudra de parties égales, telles que A C, C D, D E, E F, « ainsi que celles A G, G H, H I, I K ; soient tirées entre ces points les parallèles G C, « H D, I E, K F ; soit tracée ensuite au-dessous de la figure la droite L M que l'on fera « égale à la portion de circonférence ou arc A F par le moyen qui suit (1) :

« Sur une seconde ligne parallèle à L M on portera d'abord en X Z les deux longueurs « réunies bout à bout des deux cordes égales, dont l'une soustend le demi-arc A D, et « l'autre celui D F, qui sont égaux ; on en formera donc la droite X Z. Ensuite sur cette « même ligne, toujours à partir de X, on portera la corde totale qui soustend l'arc entier « A F, et l'on aura par cette corde la longueur X Y nécessairement plus courte que la « précédente de la petite quantité Y Z qui en sera la différence. Enfin on prendra le tiers « de cette différence, que l'on ajoutera à X Z, de Z en Δ ; alors X Δ sera si près d'être « égale à la courbe totale de l'arc A F, que, quand même celui-ci serait la sixième partie « de la circonférence (et ici on n'aura jamais besoin de plus), la droite X Δ ne différerait « pas de la six millième partie de sa vraie longueur, comme il est démontré dans ce que « nous avons dit précédemment sur la *grandeur du cercle*. Faites ensuite L M égale à X Δ, « et divisez L M en autant de parties égales que l'arc A F ou son pareil A G (ces parties « seront un peu plus longues que les cordes des parties de l'arc que l'on n'aurait pu « mesurer qu'au compas de la petite différence en longueur réelle de la ligne droite de la

(1) Les deux lignes citées ont été omises au-dessous de la fig. 7, pl. II, mais on les retrouvera restituées dans notre pl. XXXVIII, fig. 5, et suivant la proportion de la fig. 7 de la pl. II.

« corde, comparée à la courbe de chaque portion d'arc correspondante que l'on ne peut « mesurer au compas que comme des cordes). Alors, continuant l'opération ci-dessus :

« Portez sur la parallèle C G, et de C en N, une seule de ces parties ou divisions de « la droite L M : cette longueur dépassera un peu la ligne diamétrale A B ; vous porterez « aussi la même partie depuis G jusqu'en O, en sorte que les deux longueurs enjam- « beront de très-peu l'une sur l'autre et arriveront de chaque côté au delà de A B, comme « en N O. Faites de même D P et H Q égales chacune à deux parties de L M et s'enjambant « davantage en P Q ; puis E R et I S égales chacune à trois parties de L M et s'enjambant « encore plus sur la parallèle I E ; enfin, faites F T et K V égales chacune à la ligne « totale L M.

« Si les deux courbes cherchées sont décrites par les points A O Q S V d'un côté, et de « l'autre par des points A N P R T, ces courbes seront les deux parties de cycloïde deman- « dées, et entre lesquelles les cordons du pendule devront être suspendus, pour se ployer « alternativement sur les courbes.

« Mais, pour mieux faire comprendre, ajoute Huyghens, l'admirable propriété et les « effets de cette courbe, nous avons cru devoir exprimer dans une autre figure plus com- « plète (voyez fig. 18, pl. II) les deux demi-cycloïdes entre lesquelles est suspendu le « pendule O B P, dont la longueur est double de celle du diamètre du cercle générateur « O B, et dont les oscillations d'une amplitude quelconque, jusqu'à la plus grande, qui « parcourt tout l'arc C P C', doivent s'achever en temps égaux (en supposant la verge « entière composée d'un cordon flexible), et de manière que le centre A P parcoure « toujours (tout ou partie de) la courbe cycloïdale C P C', qui doit être elle-même la « cycloïde exacte. Je ne connais pas d'autre courbe ayant cette *insigne* propriété d'être « décrite elle-même par sa propre *évolution* (sa développante). Mais tout ce qui vient d'être « dit sera plus étendu dans la suite, où nous traiterons de la descente des graves et de « l'*évolution* (développement) des courbes (1). »

Nota. La gravure ne donne dans cette fig. 18, et ordinairement dans les figures de ce genre, que des portions de cercle, vu leur peu de différence d'avec la courbe véritable ; mais le lecteur doit être prévenu par le texte que ces parties cycloïdales sont à peu près des demi-ellipses ou ovales, dont le grand diamètre serait horizontal dans la figure.

1372. Nous remarquerons aussi, à l'égard de la pl. XXXVIII de ce second volume, qu'elle ne concerne guère que les engrenages de champ *coniques* que nous avons expliqués (art. 1353-54 et 55), et que ces figures sont plus à l'usage du *Mécanicien* proprement

(1) L'édition in-folio de Huyghens, *Horologium oscillatorium*, 1663, Paris, Muguet, faite sous les yeux de l'auteur, porte deux fautes dans les lettres de renvoi du texte, tandis que, dans la fig. en bois intercalée du même livre, les lettres sont exactes. Mais dans l'édition *Opera varia*, du même auteur, 3 vol. in-4°, La Haye, Janson Vander Aa, ces fautes ont été corrigées. Les anciennes éditions, et même les contrefaçons de la Hollande, étaient souvent plus correctes que les éditions originales ; cette correction devient importante dans les ouvrages latins de géométrie.

dit que de l'horloger ; mais celui-ci doit les connaître, car les rouages astronomiques et diverses autres machines délicates et précises, et alors du ressort de l'horlogerie, nécessitent souvent des changements dans la direction des axes des mobiles qui s'engrènent, et l'uniformité de la menée peut y être essentielle. C'est pour compléter cette matière que nous avons cru devoir donner cette suite de figures, utile aussi dans les conduites de grosses Horloges et généralement partout où il est nécessaire de ménager les frottements, les résistances et la direction régulière des forces. Dans ces grosses machines, et surtout quand le mobile mené est assez nombré, une moindre partie de la naissance de l'ogive qui mène étant seule employée, on en retranche plus ou moins la pointe, un peu au delà de la partie menante, comme nous l'avons dit ailleurs, et comme on le voit dans plusieurs figures de la planche XXXVIII et particulièrement dans l'engrenage à angle droit de sa fig. 7, où deux roues nombrées engrènent ensemble et forment ce qu'on appelle en mécanique *Engrenage d'angle*. C'est l'engrenage d'horlogerie appelé engrenage *de champ*, mais le premier est disposé suivant la rigueur des principes, tandis que le second n'en est qu'une modification forcée par la réduction des dimensions et l'absence d'outils spéciaux. Dans les grosses machines, il reste aux dents des mobiles nombrés une si petite partie de la naissance de leur ogive, que ces dents paraissent presque carrées; mais le commencement utile de la courbe n'y est pas moins conservé, ou bien il s'y forme par l'usure et l'usage de la machine. La même ogive ou sa portion est souvent aussi conservée semblable pour deux mobiles qui s'engrènent, lorsqu'ils doivent éprouver un va-et-vient où chacun des deux mobiles est alternativement menant et mené. L'angle des axes, avec l'engrenage conique, peut être différent de notre figure, c'est-à-dire plus ou moins obtus ou aigu, sans rien changer au principe général des engrenages coniques, dont les axes et les cônes ont alors une direction proportionnelle, etc., etc. Les détails où nous sommes entré dirigeront d'ailleurs dans les cas dont nous n'avons pas fait mention, si l'on a bien saisi les principes généraux que nous croyons avoir suffisamment exposés.

1373. Quant à la fig. 7 de notre pl. II, dont le complément manque pour l'explication de Huyghens que nous venons de donner, on voit que ce complément des deux lignes L M et X, Y Z Δ se retrouve dans notre planche XXXVIII, fig. 5, établi suivant la proportion de la fig. 7 de la pl. II qui représente en A N P R T et en A O Q S V deux portions suffisantes de lames cycloïdales en métal, de l'épaisseur que l'on juge convenable pour faire ployer sur elles les cordons de suspension du pendule, et faire parcourir au centre d'*oscillation* ou de percussion du pendule une cycloïde semblable à celle des lames, afin que les oscillations soient isochrones. La distance du *centre de suspension* au centre d'*oscillation* ou de percussion, centres qu'il ne faut pas confondre, cette distance, disons-nous, que l'on suppose ici être le centre de la lentille, parce que la verge ou le fil qui en tient lieu sont très-légers, est la véritable mesure de la longueur virtuelle du pendule, celui dont la verge serait supposée inflexible et néanmoins sans pesanteur, tandis que tout le poids du bas, c'est-à-dire de ce que nous appelons la *lentille*, à cause de sa forme, serait supposé réuni au seul point de son

centre, abstraction faite de toute résistance de la suspension et de l'air ambiant. La pensée d'Huyghens était savante et son application ingénieuse, mais malheureusement inapplicable et sans remède. Des cordons flexibles aussi longs que les lames y adhéraient inégalement suivant l'état hygrométrique de l'air, qui influait aussi sur leur longueur et sur leur résistance à se ployer. Huyghens essaya vainement des chaînes métalliques et même d'or (métal le moins convenable par sa dilatation alors inconnue); le frottement variable des anneaux et leur application aux courbes étaient encore un inconvénient majeur. Nous laissons de côté d'autres objections géométriques et mécaniques faites alors au principe de Huyghens, et qu'il paraît avoir suffisamment réfutées, mais cette première idée en suggéra une autre très-approximative : ce fut d'employer l'échappement à ancre permettant de très-petits arcs, circulaires, il est vrai, mais qui se confondaient sensiblement pour peu de degrés avec les petits arcs de cycloïde. On exagéra ensuite ce moyen, en ne donnant au pendule que des arcs d'un demi-degré et même d'un quart de degré, avec une lentille d'autant plus pesante, de 60 à 80 livres et plus, pour récupérer par sa masse la force acquise des grands arcs. Mais on tomba alors dans l'inconvénient de voir les oscillations s'arrêter par l'ébranlement du mur auquel l'horloge était appliquée, au moment du passage de fortes voitures ou par d'autres causes; d'ailleurs, la suspension à couteau, tant préconisée par Ferdinand Berthoud dans son Essai, et qui était alors imitée partout, ne pouvait résister à ce poids considérable des lentilles; l'angle du couteau s'affaissait ou creusait la gouttière. Enfin on en revint à des proportions plus modérées avec un pendule de 20 à 25 livres, y compris les verges de compensation, et à l'usage de la suspension à deux ressorts, avec des arcs de deux à trois degrés, et l'on en obtint plus de régularité et de constance; c'est la proportion que l'on adopte aujourd'hui généralement. Il paraît en effet que des ressorts ainsi établis suivant certaine force, certaine longueur ménagée, et d'autres attentions convenables, peuvent très-bien suppléer à ce qui manque d'isochronisme sous ce rapport. Ce résultat a été déjà pressenti par la théorie, ainsi que nous l'avons dit au commencement de cet ouvrage et ailleurs; mais, comme à toutes les combinaisons de l'art, il faut l'expérience. *Clément* paraît y avoir mis le premier *un seul* ressort.

1374. On trouve encore dans d'autres auteurs des méthodes différentes pour tracer la cycloïde et l'épicycloïde, soit *allongées* soit *accourcies*, qui ne sont qu'une variété de la première; mais on doit préférer celles qui donnent un trait continu, comme pages 101 et suivantes de l'introduction au tome Ier. Cette courbe trouve de très-utiles applications dans la mécanique, en s'adaptant par la plus heureuse rencontre, et comme si elle eût été composée exprès, à toute menée ou conduite qui exige d'un premier mouvement circulaire l'uniformité de menée ou de pression. Estimé et adopté par les mécaniciens instruits, son usage, ou au moins celui de la portion de cercle qui la remplace très-approximativement, n'a trouvé d'opposition que dans la routine de quelques horlogers plus praticiens qu'artistes, qui, s'appuyant sur quelque talent naturel et une longue expérience que nous voulons bien ne pas toujours leur contester, n'ont été que trop longtemps, et actuellement

encore, sans vouloir écouter de théorie (1); ce n'est, au reste, que pour familiariser avec elle quelques esprits encore rétifs, et surtout d'autres moins prévenus, que nous allons revenir ici sur la partie historique de cette courbe, non moins précieuse que singulière, comme exemple de l'utilité de la géométrie, et èn avertissant ceux que la question n'intéresse pas qu'ils peuvent passer ces articles sans inconvénient, attendu qu'il n'y a rien là pour eux. Des esprits d'une autre trempe nous ont si souvent sollicité de ne pas négliger la partie mathématique de l'Horlogerie, que nous saisissons les occasions de satisfaire en partie à leur opinion, que, du reste, nous partageons amplement; nous en aurions même préféré l'emploi plus général, si ce n'eût été la nécessité de mettre cet ouvrage à la portée du plus grand nombre, de ceux surtout qui en ont tant de besoin, et parmi lesquels il s'en trouve beaucoup qui ne s'en doutent même pas.

« La cycloïde, dit d'*Alembert*, est une courbe assez moderne; quelques-uns en attribuent « la découverte au *P. Mersenne*, d'autres à *Gallilée;* mais *Wallis* lui donne une plus ancienne « date, et dit qu'elle a été connue par un certain *Bovillus* vers 1500, que même le car- « dinal *Cusa* en avait fait mention avant 1451. Cette courbe a des propriétés bien singu- « lières : son identité avec sa développée, les chutes en temps égaux par des arcs inégaux « de cette courbe, et la plus vite descente, sont les plus remarquables. En général, plus « on a approfondi, la cycloïde et plus on y a trouvé de singularités. Si l'on veut que les « oscillations naturellement inégales d'un pendule se fassent en des temps exactement « égaux, il faut qu'il décrive, non des arcs de cercle, mais des arcs de cycloïde. Si l'on « développe une demi-cycloïde, *en commençant* par le *sommet* (le point du milieu de la « courbe), elle rend par son développement une autre demi-cycloïde semblable et égale; « et l'on sait quel usage M. Huyghens fit de ces deux propriétés pour l'Horlogerie. En 1697, « M. *Bernouilli*, professeur de mathématiques à Groningue, proposa le problème suivant « à tous les géomètres de l'Europe : Supposé qu'un corps tombât *obliquement* à l'horizon, « quelle était la ligne courbe qu'il devait décrire pour tomber le plus vite possible? Car, « ce qui peut paraître étonnant, il ne devait point décrire une ligne droite (*oblique*), quoi- « que plus courte que toutes les lignes courbes terminées par les mêmes points. Ce pro-

(1) ... Oh! vous allez encore nous parler de *cycloïde!* de *cercle générateur!* de *diamètres primitifs!* nous n'avons pas besoin de ça pour faire de bons engrenages !... Nous savons notre *métier* sans tout ça !.. — L'expression est très-juste, messieurs, mais il s'agit d'*Art* et de l'instruction qui en est la base. L'instinct du *métier*, comme vous l'appelez, suffit pour s'occuper de bénéfices et multiplier la pacotille de commerce; mais nous n'écrivons pas dans ce sens. Nous ne désirons certainement pas multiplier ces produits, il n'y en a déjà que trop. Cet instinct, perfectionné chez un petit nombre d'entre vous, pourra bien prévenir dans vos engrenages les accotements, le trop d'arc-boutement, en faisant pénétrer vos dentures outre mesure; mais produira-t-il jamais une menée et une puissance uniformes? et, si vous rencontriez, par hasard, ce degré plus ou moins approché, vous n'en auriez aucune certitude, à moins que par des épreuves et des moyens que sûrement vous n'auriez ni la volonté, ni la patience, ni le temps d'employer; ils seraient d'ailleurs trop en opposition avec la rapidité du travail que seul vous ambitionnez, et cet assujettissement conviendrait peu à l'exécution de pacotille;... tandis qu'avec une méthode basée sur la théorie, et avec les moyens simples d'application que l'on offre ici, à ceux-là seulement qui sont capables de les apprécier, le succès prompt et certain n'a pas même besoin de vérification!!! Mais il y a encore des artistes qui s'intéressent à leur Art.

« blème résolu, il se trouva que cette courbe était une *cycloïde*. Une des plus importantes « connaissances des courbes est la mesure exacte de l'espace qu'elles renferment, ou seules, « ou avec des lignes droites, et c'est ce qu'on appelle leur quadrature (pr. *coua*; méthode « pour quarrer (*ca*) leur surface, c'est-à-dire déterminer un carré exactement égal en su- « perficie à cette surface). Si cette quadrature se peut mesurer, quelle que soit la portion « de la courbe qui y entre, ou les parties du diamètre qui la terminent avec elle, c'est la « quadrature absolue ou indéfinie, telle qu'on l'a de la parabole. Mais il arrive quelque- « fois que l'on ne peut quarrer que des espaces renfermés par de certaines portions de la « courbe, ou par certaines *ordonnées*, ou de certaines parties déterminées du diamètre. « On vit d'abord que la quadrature indéfinie de la cycloïde dépendait de celle de son « *cercle* générateur, et que par conséquent elle était impossible selon toutes les apparences « (comme la quadrature du *cercle*). Mais M. *Huyghens* trouva le premier la quadrature « d'un certain espace cycloïdal déterminé. M. *Leibnitz* ensuite trouva encore celle d'un « autre espace pareillement déterminé; et l'on croyait qu'après ces deux grands géomètres « on ne trouverait plus aucun espace quarrable dans la cycloïde. Cependant M. Bernouilli « découvrit depuis une infinité d'espaces quarrables, dans lesquels sont compris, et pour « ainsi dire absorbés, les deux de M. *Huyghens* et de M. *Leibnitz*. C'est ainsi que la géo- « métrie, à mesure qu'elle est maniée par de grands génies, va presque toujours s'élevant « du particulier à l'universel, et même à l'infini.

« M. *Huyghens* a démontré le premier que, de quelque point ou hauteur que descende « un corps pesant qui oscille autour d'un centre, par exemple un pendule, tant que ce « corps se mouvra dans une cycloïde, les temps de ses chutes ou oscillations seront tou- « jours égaux entre eux; voici comment M. de *Fontenelle* essaye de faire concevoir cette « propriété. La nature de la cycloïde, dit-il, est telle, qu'un corps qui la décrit acquiert « plus de vitesse à mesure qu'il décrit un plus grand arc, dans la raison précise qu'il faut « pour que le temps qu'il met à décrire cet arc soit toujours le même, quelle que soit la « grandeur de l'arc que le corps parcourt; et de là vient l'égalité dans le temps, nonob- « stant l'inégalité des arcs, *parce que la vitesse* se trouve exactement plus grande ou moin- « dre, en même proportion que *l'arc est plus grand ou plus petit*. C'est cette propriété de « la cycloïde qui avait fait *appliquer* cette courbe à l'Horloge à pendule. M. *Huyghens* a « donné à ce sujet un ouvrage plein de génie et d'invention, intitulé : *Horologium oscil- « latorium*, etc. »

1375. Quant à l'*Épicycloïde*, on a déjà vu dans l'article de *Lalande* qu'elle est engendrée par la révolution du point décrivant d'un cercle générateur, lequel se meut en tournant, non plus sur une ligne droite comme la simple cycloïde, *mais sur la partie convexe ou concave* d'un autre cercle.

« Si le mouvement progressif du cercle roulant (ou générateur) est plus grand que son « mouvement circulaire, la *cycloïde*, comme l'*épicycloïde*, sont nommées *allongées*; on les « dit *accourcies*, si ce mouvement progressif est plus petit.

« Lorsque le cercle générateur se meut sur la convexité d'une circonférence, l'épicy- « cloïde est nommée *extérieure*, et *intérieure* s'il se meut sur ou dans sa concavité. On

« appelle *base* la partie sur laquelle se développe le cercle générateur, tandis qu'il fait « tout ou partie de sa révolution.

« On trouve dans les *Transactions philosophiques* de la Société royale de Londres, « n° 18, et dans les *Infiniment petits* du marquis de *L'Hôpital*, les démonstrations des « principales propriétés des épicycloïdes, surtout ce qui concerne les tangentes de ces « courbes, leurs rectifications et leurs quadratures. *Nicole* a aussi donné sur la rectifica- « tion des épicycloïdes *allongées* et *accourcies* un excellent Mémoire dans le volume de « l'Académie de 1708; le volume de 1732 renferme plusieurs écrits de MM. *Bernouilli*, « *Maupertuis*, *Nicole* et *Clairaut* sur une autre espèce d'épicycloïdes appelées *épicycloïdes* « *sphériques*; ces courbes sont aussi engendrées par le point décrivant d'un cercle qui « roule sur un autre cercle; mais avec cette différence que, dans les épicycloïdes ordi- « naires, le cercle roulant est dans le même plan que le cercle sur lequel il roule; au lieu « que dans celles *sphériques* le plan du cercle roulant fait un angle constant avec le plan « de l'autre cercle qui lui sert de base. Les *épicycloïdes sphériques* ont plusieurs belles « propriétés que l'on peut voir dans les Mémoires dont nous venons de parler (article de « d'*Alembert* (1). » On voit qu'il s'agit ici de nos engrenages de champ coniques. Le sur- plus de ces questions, ne pouvant concerner que la haute *mécanique spéciale*, aurait trop peu d'intérêt pour l'horlogerie actuelle.

(1) Cet article de d'*Alembert* s'étend, sous divers rapports, bien au delà de nos applications, mais il ne fait pas ici mention des dentures, à quoi le savant auteur a pu suppléer ailleurs; nous l'avons rapporté d'abord dans l'intérêt des théoriciens qui désirent connaître l'opinion des maîtres de la science, et ensuite en vue de quelques assertions mathématiques, qui, en attendant la démonstration, doivent être, au moins provisoirement, une autorité probable contre l'opinion de ceux qui nient que l'isochronisme des oscillations et des vibrations soit déterminé par des dispositions particulières;... qui prétendent enfin que tout pendule est isochrone de sa nature, etc. On sait assez, du reste, que les anciens géomètres ont appuyé l'opinion contraire sur des démonstrations qu'il serait trop long d'exposer ici, mais qu'on peut aisément se procurer; relativement au pendule, elles ne sont contredites que par ceux qui n'ont pas approfondi la question de la descente des corps dans le cercle, où certainement les arcs de diverse étendue ne sont pas parcourus en temps égaux; l'expérience pratique démontre d'ailleurs bien suffisamment que les arcs inégaux dans le cercle ne sont pas isochrones; et, à défaut de démonstration géométrique, l'horlogerie seule y aurait suppléé; car, quelque peu sensible que soit la différence, dans ce cas, la répétition multipliée des oscillations dans des circonstances appropriées et constantes devient un microscope intellectuel qui s'accorde ici complétement avec les principes de la science.

Quant à l'explication par *Fontenelle* des effets de la cycloïde, elle nous paraît marcher dans un cercle vicieux, et tourner autour de la question au lieu d'y entrer, en ne nous apprenant précisément que ce qui est un fait bien connu. Si nous osions suppléer aux expressions de cet académicien spirituel, mais qu'on a souvent trouvé plus ingénieux que profond, nous dirions : La courbe cycloïdale produit une descente plus rapide que la ligne droite oblique; mais la vitesse est encore plus grande dans la descente suivant la perpendiculaire : or l'avantage de la cycloïde sur la ligne droite oblique provient de ce que, plus le point de départ est élevé dans la cycloïde, et plus le corps descendant approche, dans cette partie élevée, de suivre la perpendiculaire, et de ce qu'il trouve, dans ce rapprochement, autant de vitesse augmentée qu'il en perdrait par l'augmentation de la courbe, d'où résulte le phénomène, qu'en tombant de plus haut le corps y acquiert juste la vitesse nécessaire pour compenser la plus grande étendue de l'arc parcouru. Ce n'est pas ici le lieu de démontrer, par l'analyse, cette explication, qui nous paraîtrait mieux rentrer dans la question

Du calcul des rouages.

1376. Ceux qui sont occupés forcément du rhabillage, quoique souvent très-capables de faire mieux, y trouvent des calculs établis qu'ils sont obligés de laisser, et peuvent par là être déshabitués de se livrer à ceux d'un calibre différent. Cette étude est néanmoins utile dans bien des cas à l'horloger mécanicien, et devient un article nécessaire de l'ouvrage actuel; il est une suite obligée de celui de l'engrenage. La plupart des auteurs ont réuni ces deux articles, et nous suivons leur exemple. Nous commencerons par les applications les plus simples, sans considérer leur date; nous passerons ensuite à d'autres un peu plus composées; et nous laisserons aux artistes calculateurs le soin de s'en faire eux-mêmes pour des cas plus compliqués, d'autant qu'en ce genre, et comme dans les cas simples, chacun pourra facilement se créer la sienne de lui-même, ou d'après ce que nous en allons exposer. Nous commençons par une indication extraite de Thiout; il s'agit ici d'une Montre très-ordinaire de son temps, où l'on n'employait que des pignons de 6, à l'exception de celui du centre, qui était seul alors de 10 à 12. Thiout intitule cet article : *Explication sur le rouage.*

1377. Après avoir parlé de la Montre ordinaire à roue de rencontre dont la roue du centre ou des minutes fait un tour par heure et porte ici 54 dents, l'auteur ajoute : « Cette « roue de minutes engrène dans le pignon de 6 ailes de la petite moyenne, qui fait par ce « moyen 9 tours par heure; la petite moyenne a 48 dents et engrène dans le pignon de 6 « de la roue de champ, qui fait 8 tours pour un de la petite moyenne. Si donc on multi- « plie les 9 tours précédents de la petite moyenne par les 8 tours que celle-ci fait faire à « la roue de champ, on aura 72 tours de la roue de champ par heure. Cette roue de champ « a encore 48 dents, et engrène dans le pignon de 6 de la roue de rencontre, à qui la roue « de champ fait faire aussi 8 tours; et, si on multiplie les 72 tours déjà trouvés par ces « 8 tours-ci, le produit sera 576 tours de la roue de rencontre de 15 dents (on sait qu'il « y en a de 11, 13, etc., toujours en nombre impair). Comme on doit doubler le nombre « de cette dernière, ce qui fait ici 30, parce que chaque dent produit une allée et un « retour du balancier qui font deux vibrations, les 576 tours de la roue d'échappement « multipliés par 30 donneront au produit 17,280 vibrations, procurées par les nombres « ci-dessus, dans la Montre ordinaire dont il s'agit uniquement ici. »

1378. Ce calcul est clair, moyennant quelques corrections que nous nous sommes permises pour le faciliter, et l'on peut se servir de cette méthode, soit pour connaître la quantité de vibrations par heure de tout autre calibre suivant ses propres nombres, soit pour en chercher ou en former d'autres à volonté, avec des nombres convenables.

1379. Nous passerons à une autre exposition du même auteur; dans son ouvrage, elle précède de plusieurs pages celle ci-dessus, que nous avons rapportée la première à cause de sa simplicité.

1380. Après quelques observations préliminaires de Thiout sur le mode d'action de la puissance motrice, les rapports de grandeur, etc., dont nos lecteurs sont déjà instruits,

ne fût-ce que par nos articles précédents sur l'engrenage, et que nous omettons par ce motif, l'auteur continue à peu près comme il suit :

« Supposons présentement les engrenages successifs de quatre roues que nous nomme-« rons I, K, M, P, sans y employer de planche ; la 1re roue I, n'étant précédée d'aucune « autre, n'a pas besoin de pignon sur sa tige (il peut y être remplacé par un barillet mû « par un grand ressort, ou par un cylindre ou tambour enveloppé de plusieurs tours « d'une corde tirée par un poids) ; supposons que cette première roue I porte 64 dents, et « qu'elle engrène dans le pignon de 8 ailes de la 2e roue K portée par l'axe de ce pignon, « et garnie de 48 dents ; que celles-ci engrènent de même dans le pignon de 6 ailes de la « roue M qui aura 30 dents ; et enfin que la roue M de 30 dents engrène avec le pignon « de 5 (1) de la roue d'échappement P de 15 dents, et qui, en raison des deux oscillations « ou vibrations pour chaque dent, doit être considérée ici comme ayant 30 dents ; pour « connaître le nombre de tours ou de révolutions que feront chacun de ces mobiles pour « un tour du premier, nous en placerons les noms et les nombres de la manière suivante :

	roues.	*pignons.*	*tours ou révolutions.*
1re roue I.	64 dents.	0	1.
2e — K.	48	8 ailes.	8.
3e — M.	30	6	64.
4e — P.	15 p. 3	5	384.

Nota. *Les traits obliques tirés des roues aux pignons signifient que la roue où commence le trait, à gauche, engrène avec le pignon, où ce trait va finir à droite.* Ce pignon est fixé sur l'axe de la roue qui le précède dans sa même ligne horizontale.

« La 1re roue I de 64 dents, sans pignon, faisant un seul tour et engrenant avec le pignon « de 8 ailes de la 2e roue K, lui fera faire 8 tours, pendant que la roue I n'en fera qu'un, « parce que dans 64 il y a tout juste 8 fois 8.

« La 2e roue K de 48 dents engrenant avec le pignon de 6 de la 3e roue M lui fera « faire 8 tours pour un seul de la roue K, parce que en 48 il y a 8 fois 6 ; et comme K

(1) Le *Traité des horloges*, du père Alexandre, l'un des plus anciens ouvrages français en ce genre, est de 1734. Le *Traité de l'horlogerie*, de Thiout, est de 1741, n'étant postérieur au précédent que de 7 ans. *Thiout* parle ici de pignon de 5, mais il est probable que cette supposition n'y est admise par lui que pour simplifier son calcul. Ceci explique néanmoins comment *Camus*, dans son Cours de mathématiques, établit ses premiers exemples et ses premières figures avec des pignons de 5, ainsi que nous l'avons remarqué plus haut (art. 1340, page 275 de ce 2e vol.). *Camus* avait déjà communiqué à l'Académie des sciences de Paris des mémoires sur l'engrenage, lorsque *Thiout* les a rapportés en entier, mais avec des fautes de renvoi et plusieurs autres. *Camus* a reproduit plus tard ce même sujet, bien mieux développé dans le quatrième volume de son Cours de mathématiques, d'où nous avons tiré plusieurs articles, et notamment la pl. XXXVI et une partie du texte relatif, ainsi qu'il y est dit. L'ouvrage de *Thiout* est très-mal rédigé, sans doute, et plus détestablement imprimé : les fautes d'orthographe et de ponctuation y produisent de fréquents contre-sens ; cependant les connaisseurs peuvent encore y distinguer des idées utiles, et quelques jugements assez sains que nous recueillons. Les divers défauts de cet ouvrage tiennent en grande partie à son époque.

« fait déjà 8 tours pour un de la 1re roue I, il faut multiplier 8 par 8, qui donnent 64; « de sorte que la roue M et son pignon 6 feront 64 tours pour un de la 1re roue I.

« La 3e roue M de 30 dents engrenant avec le pignon 5 de la 4e roue P lui fait faire 6 « tours pour un seul de la roue M, parce que dans 30 il y a 6 fois 5 (ce pignon de 5, « inusité dans les calibres, n'est supposé ici que pour simplifier le calcul); et, comme M « fait déjà 64 tours pour un de la 1re roue I, si on multiplie 64 par 6, il viendra au pro- « duit 384, qui sera le nombre de tours que la 4e roue P fera pour un tour de la « 1re roue I.

1381. « Examinons maintenant comment ces roues se communiquent les unes aux « autres la force qu'elles reçoivent du moteur. On suivra ici, ajoute Thiout, ce qu'en dit « Sully.

« Si l'on suppose un poids faisant tourner le cylindre de la 1re roue I au moyen de sa « corde qui l'enveloppe, il est évident que, par l'effet connu de l'encliquetage du cylindre « avec cette roue I, elle tournera tant qu'il y aura des tours de corde à développer. Sup- « posons pour le moment ce poids être de 80 livres, on conçoit que par le principe du « levier, le poids de 80 livres ne pèsera que de 40 livres à la circonférence de la roue, si « le diamètre de celle-ci est double de celui de son cylindre; et que la force, étant ici « *inverse* des rayons ou des diamètres, diminue à la circonférence de la roue à propor- « tion que le rayon de cette roue est augmenté, le cylindre restant le même : d'où il suit « que la force transmise à l'engrenage ou à la circonférence de la roue est à celle de la « circonférence du cylindre comme le diamètre ou le rayon du cylindre est au diamètre « ou rayon de la roue : et que, si le diamètre ou rayon du cylindre n'était que le quart ou « le tiers du diamètre ou rayon de la roue, la force résultante à la circonférence de « la roue ne serait que le quart ou le tiers de la force agissant à la circonférence du « cylindre. Il en est de même ici des pignons et des roues dentées qui sont sur le même « axe, en comparant le rayon du pignon sur lequel la force agit directement à l'autre « rayon de sa roue par lequel la force est transmise.

« Pour retrouver ses rapports *inverses* dans le rouage de l'exemple précédent, nous sup- « poserons les diamètres des roues et des pignons exprimés en lignes, et proportionnels « aux nombres des dents et des ailes. On peut du reste exprimer ces diamètres en unités « d'autre mesure, suivant la grandeur adoptée. Le même calcul s'applique en petit « comme en grand.

« Supposons donc la 1re roue I de 64 lignes de diamètre, et celui de son cylindre de 32 « lignes; à la 2e roue K 48 lignes de diamètre, et à son pignon 8 lignes; enfin à la 3e M « et à la 4e P, leurs diamètres en nombre de lignes exprimés de même par les nombres « de leurs dents et de leurs ailes.

« Soit le cylindre de la 1re roue I de 32 lignes de diamètre, auquel est appliqué un « poids de 10,000 (dix mille, grains, gros, onces, ou livres, suivant la dimension du « rouage). Il suit, de ce que nous venons de dire précédemment, qu'une force comme « 10,000 agissant sur la circonférence du cylindre diminue de moitié à la circonférence « de la roue, puisque le diamètre de la roue est double de celui de son cylindre. Il n'y

« aura donc que 5,000 de force à la circonférence de la 1re roue. Cette force, étant com-
« muniquée au pignon de la 2e roue, diminuera encore dans la raison inverse du diamè-
« tre de ce pignon à celui de sa roue sur le même axe. Ainsi, le pignon étant de 8 lignes
« et sa roue de 48, il ne restera à la circonférence de la 2e roue que la 6e partie de 5,000,
« c'est-à-dire 833 de force employée à faire tourner le pignon de 6 lignes de diamètre
« de la 3e roue du même axe, laquelle a pour diamètre 30 lignes; les 6 lignes de ce pi-
« gnon n'étant que le 5e de 30 lignes, il ne restera à la circonférence de la 3e roue que
« 166 de force (plus une petite fraction que nous négligeons), 166 étant la 5e partie
« de 833. La roue de 30 lignes faisant tourner le pignon de 5 lignes de la 4e roue de 15,
« et ce pignon de 5 lignes étant le tiers de la 4e roue de 15 lignes, il est évident que la
« force résultante aux dents de la 4e roue sera le tiers de 166, c'est-à-dire 55 + 1/3. Or,
« suivant l'estimation moyenne généralement admise comme provisoire, à la différence
« près de la disposition spéciale des machines, on compte sur l'absorption d'un tiers envi-
« ron de la force par les frottements, résistances des cordes, etc. Au moyen d'un retran-
« chement analogue, il ne restera donc que 37 de force à la circonférence de la 4e roue.

« On voit par là combien est rapide la diminution de la force à la dernière roue; mais
« l'on conçoit qu'une machine ainsi composée de roues dentées et de pignons *assez bien*
« *travaillés* pour que ces mobiles puissent s'engrener et que les unes fassent tourner les
« autres, exigera un certain temps pour qu'ils fassent leurs révolutions, et que ce temps
« sera encore multiplié par le nombre des tours de corde qui envelopperont le cylindre
« de la première roue. Ainsi, en supposant que la première roue emploie douze heures à
« faire une révolution, si on fixe à l'arbre de cette roue une aiguille qui y emploiera le
« même temps, ce tour divisé en douze parties permettra à l'aiguille de marquer les heures.
« On sait aussi que la rapidité du mouvement dépend de la pesanteur du poids; mais,
« quelque multiplié que soit le nombre des mobiles, un rouage va toujours trop vite, par
« sa force acquise, trop irrégulière, par l'accélération et les inégalités de l'exécution; il a
« donc fallu imaginer un moyen de le ralentir et régulariser, qui est ce qu'on nomme
« l'*échappement*. Le balancier dans les Montres, et le pendule dans les Horloges publiques
« et celles d'appartement, règlent les mouvements de ce mécanisme particulier, qui retient
« le rouage par des intervalles plus ou moins rapprochés, et ne permet à chaque dent de
« la dernière roue d'échapper qu'avec chaque vibration ou oscillation. Le temps de ces
« vibrations du balancier et de ces oscillations du pendule dépend de la grandeur et du
« poids du balancier, ou de la longueur du pendule. » (Voyez l'article des *Échappe-
ments.*)

1382. Après ces premières notions de Thiout, que nous avons cru devoir modifier et abréger un peu; nous passons aux plus simples articles de Ferdinand Berthoud sur le même sujet; ils sont plus longs; mais, parmi divers auteurs qui ont traité ce sujet, ceux de Berthoud nous ont paru les plus clairs et les plus accessibles pour les lecteurs qui pourraient, ou n'y être pas habitués, ou en avoir oublié la pratique.

1383. Au commencement du deuxième volume de son *Essai*, Ferdinand Berthoud traite du principe géométrique de l'engrenage, ainsi que l'ont fait la plupart des autres auteurs

d'horlogerie; il y emploie la même méthode que Thiout avait publiée environ quinze ans plus tôt; *mais aucun d'eux n'a donné de bonne méthode pratique d'application*.

Ferdinand Berthoud ajoute à la méthode de calcul de Thiout plusieurs avis généraux, dont les uns sont excellents, et d'autres singulièrement erronés. Il recommande, par exemple, l'usage des roues petites et légères, pour en réduire l'inertie, ce qui convient en effet dans bien des cas; puis, pour y arriver, il préconise l'emploi si défectueux des pignons de 6, oubliant que, outre leur arc-boutement considérable avant la ligne des centres, ce sont les pignons de bas nombre qui produisent le plus d'inertie à leur rentrée avant le centre, et le plus de frottement pendant la menée après le centre; et, dans d'autres articles de ses nombreux écrits, le même auteur n'emploie plus que des pignons de 16, 18, 20, et même plus, en les recommandant pour l'amélioration de l'engrenage. On voit que Berthoud en agit souvent comme certains *inventeurs* qui, pour effectuer une idée qui les préoccupe, ne craignent pas de se servir des moyens qu'ils ont jadis désapprouvés; le même auteur propose ailleurs de réduire à moitié et à moins encore l'épaisseur des ailes du pignon de 6, pour diminuer leur arc-boutement avant le centre; conseil peu admissible généralement, vu que des ailes aussi minces se fausseraient à la trempe et n'offriraient pas du reste la solidité et la résistance nécessaires dans bien des cas; qu'on ne trouverait pas, dans la pratique ordinaire, de limes à arrondir propres à la denture que Berthoud propose, et qui, si elle s'accorde en un sens avec le principe géométrique, est inexécutable dans la pratique ordinaire. La difficulté en ce cas est en effet de combiner les vrais principes avec les moyens faciles d'exécution, comme nous l'avons fait dans notre méthode, qui n'exige que les moyens pratiques connus et usités. Nous avons déjà traité ce sujet ailleurs, et même dans notre introduction du premier volume, en renvoyant alors aux figures de la planche II, et nous n'y reviendrons pas ici, pas plus que sur les nombreuses contradictions de Berthoud, non-seulement dans ses 7 volumes in-4°, que peu d'horlogers ou d'amateurs possèdent ou connaissent, mais même dans son *Essai* d'un volume à l'autre. Il importe aux lecteurs de tenir compte de ces observations *renouvelées exprès*.

Il est juste aussi de convenir que Ferdinand Berthoud, joignant à sa théorie parfois égarée une pratique réfléchie, a rendu de grands services à l'horlogerie de son temps, soit en habituant les artistes à raisonner, et même en leur apprenant à le refuter lui-même, soit par ses tentatives si multipliées et ses nombreux travaux, bien que plusieurs soient des exemples de ce qu'il faut éviter, comme il a eu la sincérité d'en convenir quelquefois lui-même; et qu'enfin il n'a pas laissé de donner de très-bons articles, pour ceux qui savent les discerner. C'est ce qui nous engage à le citer souvent, et à en extraire plusieurs parties utiles, comme celle qui suit, sur le *Calcul des révolutions des roues*, que nous donnons ici *presque* textuellement. D'ailleurs, le raisonnement des chiffres est en général le plus certain.

« Mon objet, dit Berthoud, étant de rendre cet ouvrage utile aux amateurs artistes et aux ouvriers, j'ai cru qu'en faveur de ces derniers il fallait le traiter le plus simplement possible, en les instruisant : c'est suivant ces vues que je place ici les méthodes *communes* de trouver le nombre des révolutions de la dernière roue d'un rouage, de calculer le

nombre des vibrations, de déterminer le nombre des dents à mettre aux rochets des Pendules et aux roues d'échappement des Montres, enfin de trouver les nombres d'un rouage. J'avoue que ceux qui savent calculer n'ont pas besoin de ce que je donne ici sur cette matière, mais je n'écris pas pour ceux qui savent. (*Nous avons déjà dit que nous n'en avons pas non plus la prétention.*)

« Lorsqu'on parle du nombre de vibrations ou d'oscillations d'une Montre ou d'une Pendule, on sous-entend toujours que c'est en une heure; ainsi, lorsqu'on dit qu'une Pendule fait, par exemple, 3,600 oscillations ou qu'une Montre fait 18,000 vibrations, on entend que c'est par heure. »

Méthode pour trouver les révolutions des rouages sans employer les fractions dans le cours du calcul, etc.

1384. « Si on multiplie les nombres de dents d'un rouage, c'est-à-dire celui de chaque mobile, l'un par l'autre (en quel ordre on voudra), et de même les nombres d'ailes des pignons l'un par l'autre, et si l'on divise le produit des roues par celui des pignons, le quotient de cette division marquera le nombre de tours du dernier pignon pour un de la première roue : soit, par exemple, un rouage dont la première roue ait 97 dents, et engrène dans un pignon de 12 ailes ou dents; que la seconde ait 73 dents et engrène dans un pignon de 7; que la troisième de 65 dents engrène encore dans un pignon de 7; on trouvera que le dernier pignon fera 782 tours, plus 449/588es, pour un tour de la première roue

« J'arrange ces nombres en cette sorte :

1re roue. . . .	97 dents, engrène dans un pignon de				12.
2e roue. . . .	73 —	—	—	.	7.
3e roue. . . .	65 —	—	—		7.

« Je multiplie la première roue de 97 par la seconde de 73, ce qui donne 7,081, que je multiplie par la troisième de 65, et dont le produit est 460,265.

« Je multiplie de même les pignons l'un par l'autre : le premier de 12 ailes par le second de 7, faisant 84, qui, multiplié par le troisième 7, donne le produit 588.

« Je divise le produit des roues 460,265 par le produit des pignons, 588, et j'ai pour quotient 782, plus 449/588es (*fraction entre* 3/4 *et* 4/5es).

« On aura donc pour quotient le nombre 782 avec la fraction 449/588 (on observera que cette fraction n'est qu'au résultat final, et qu'il n'est point question de fractions dans le cours du calcul). Ce nombre final 782 +, etc., exprimera la quantité de tours du troisième pignon pour un tour de la première roue.

« Je prends pour second exemple deux roues de 78 et de 76 qui engrènent l'une et l'autre dans deux pignons de 7 ailes : je les place de même que dans l'exemple précédent, comme il suit :

1re roue. . . . 78 dents, engrène dans un pignon de 7.
2e roue. . . . 76 — — 7.

Produit des roues. . . . 5928; produit des pignons, ci. . . . 49; divisant le produit des roues, 5928, par 49 produit des pignons, produits que l'on appelle *solides* (1), j'ai au quotient 120 plus 48/49es, lequel est égal à celui qu'on trouverait par la méthode dont il sera question plus loin, mais avec des fractions.

« Si l'une des roues dont on vient de faire le calcul est la roue des minutes d'une Pendule, et si la seconde est la roue dite de champ (le second pignon portant le rochet d'échappement), on trouvera le nombre d'oscillations que le pendule devra battre en une heure, en multipliant le quotient 120 + 48/49es, tours du second pignon, par le double du nombre des dents du rochet, puisque dans les échappements ordinaires chaque dent du rochet répond à deux oscillations du pendule. Supposons maintenant que le rochet a 33 dents; on multipliera d'abord 120 par 66, double de 33, on aura au produit 7920. Puis, multipliant 48/49es par 66, on aura 64 plus 32/49es, qui, joints à 7920, donneront au total 7984 + 32/49es (2), nombre des vibrations par heure, tandis que la première roue de 78 dents fera un tour et celle du rochet 120, plus 48/49es de tour. Nous verrons un peu plus loin, ci-après, comment on trouvera la longueur convenable du pendule.

« On voit déjà que, si on a un rouage quelconque donné, on pourra trouver aisément le nombre des révolutions de chaque pignon et roue, ainsi que le nombre d'oscillations que devra faire le pendule (ou le nombre des vibrations que devra battre le balancier s'il s'agit d'une Montre).

« Si l'on veut, par exemple, savoir le nombre d'oscillations que produira par heure le rouage ci-dessus dont le nombre du rochet est donné, on peut encore abréger l'opération en multipliant le produit des roues par le double du nombre du rochet, et en divisant ce dernier produit par le produit des pignons; le quotient donnera le nombre des oscillations. »

NOTA. Si l'on cherche, dans notre table des longueurs du pendule, le nombre d'oscillations le plus voisin de 7,984 + 32/49es, on trouvera comme le plus approché celui de 8,000, avec la longueur du pendule de 7 pouces 5 lignes et 31 centièmes de ligne, ou près de 1/3, du centre de suspension au centre de la lentille; mais, quelque simple que soit la verge, qui diffère toujours en poids d'un pendule à un autre, il faut y réserver la faculté

(1) Dans quelques auteurs modernes le produit des nombres des roues les uns par les autres est nommé le *solide* des roues, et le produit des ailes des pignons est nommé *solide* des pignons; ils disent alors qu'il faut diviser le *solide des roues* par le *solide des pignons*, etc. Ce mot, usité actuellement, en arithmétique, se dit d'un nombre multiplié par un autre, ou de plusieurs successivement, à l'imitation de la géométrie, qui mesure les corps en multipliant deux dimensions de la surface l'une par l'autre pour en avoir le carré, ensuite le produit du carré par l'épaisseur, ce qui donne le cube, ou la *solidité* du corps. Ici deux nombres seulement, multipliés l'un par l'autre, sont censés former déjà un *solide*.

(2) On observera que la fraction finale du produit 120 plus 48/49es des deux roues et des deux pignons de ce paragraphe n'entre ici que dans le calcul ci-après des oscillations, ce qui est une autre question.

de baisser un peu la lentille, même d'une ligne ou deux, pour n'en fixer définitivement la longueur que par l'expérience, suivant l'avis donné au bas de la table.

Ayant ainsi trouvé les révolutions des roues, le nombre d'oscillations ou vibrations et la longueur du pendule, lorsque le nombre de dents de la roue d'échappement est donné, il faut voir maintenant comment on détermine le nombre de dents qu'il faut mettre à une roue d'échappement, lorsque c'est au contraire la longueur du pendule et les nombres des autres roues qui sont donnés.

Trouver le nombre de la roue d'échappement, quand la longueur du pendule et le nombre des autres roues sont déjà donnés.

1385. « Soit une roue de minutes de 73 dents qui engrène dans un pignon de 6 ; et la roue dite de champ de 65 qui engrène aussi dans un autre pignon de 6, lequel porte le rochet d'échappement. On demande le nombre de dents du rochet, pour qu'il entretienne les oscillations d'un pendule de 15 pouces, longueur donnée.

« 1° 73 de la roue de minutes multiplié par 65 de la roue de champ, produit 4745.

« 2° 6 multiplié par 6, nombre des deux pignons, produit 36. Il faut diviser 4745 par 36, ce qui donnera 131 + 29/36es, nombre de tours que fera le rochet, et qu'il faut doubler parce que chaque dent produit deux oscillations. Le double de 131 + 29/36es est 263 avec une fraction 22/36es qu'on peut négliger, parce qu'on ne trouvera pas dans la table la longueur précise de 15 pouces juste et qu'il faudra choisir seulement la plus approchante, celle de 15 pouces 2 lignes 07, qui répond à 5600 oscillations. On divisera donc 5600 par 263, et le quotient 21, plus une petite fraction que l'on négligera, sera le nombre le plus approchant qu'on peut mettre au rochet, qui, faisant 131 tours par heure, produit 5535 oscillations du pendule de 15 pouces 2 lignes 07. On voit ici qu'il y a en moins 64 oscillations et une fraction d'oscillation, différence très-petite sur une heure, et qu'il faudra remonter un peu la lentille, parce que la table ne fournit pas la longueur juste de 15 pouces, mais celle plus longue de 15 pouces 2 lignes 07, la plus approchante ; cette table plus détaillée serait trop compliquée sans utilité directe, les longueurs du pendule n'ayant pas besoin d'être établies à plus près que deux ou trois lignes, attendu que l'effet seul des diverses pesanteurs de la verge y introduit environ cette différence, ce qui oblige, comme nous l'avons dit plus haut, de tenir d'abord le pendule un peu plus long, pour le raccourcir au besoin par l'expérience. Si l'on mettait ici une dent de plus au rochet, on aurait un plus grand nombre d'oscillations et un pendule plus court, mais différant davantage de la longueur donnée, laquelle n'est d'ordinaire qu'un à peu près. Le nombre de 21 au rochet est donc celui qui satisfait le mieux à la question, sauf les garnitures du pendule.

Usage des fractions dans le calcul des rouages.

1386. « La méthode précédente de calculer les révolutions des rouages est la plus simple à bien des égards, mais il y a des cas, dit Berthoud, où le calcul par les fractions est plus commode ; on va en voir ci-après l'usage pour trouver la durée de marche d'une Pendule

ou Montre, en calculer les oscillations ou vibrations, savoir le nombre de dents convenables aux roues d'échappement pour telle longueur du pendule, etc.

« On veut, par exemple, trouver le temps que marchera un rouage dont la première roue qui porte le poids, ou le barillet contenant le grand ressort moteur, a 90 dents qui engrènent dans un pignon de 14, sur l'axe duquel est fixée la deuxième grande roue, dite *de temps*, de 84 dents; celle-ci engrenant dans un pignon de 8 dont l'axe prolongé doit porter l'aiguille des minutes sur le cadran; ce même pignon de 8 est porté dans le rouage par la roue des minutes, qui doit faire nécessairement un tour par heure.

« C'est en calculant le nombre de tours de cette roue des minutes pour un de la première roue ci-dessus que l'on saura le temps que cette première roue emploie à faire un tour, et par suite le nombre de tours que devra produire un poids ou un ressort pour faire marcher ce rouage, par exemple, pendant quinze jours; le choix du ressort, ou du poids, ne change point, du reste, ce calcul que l'on établit comme il suit :

1re roue. . . . 90 engrène dans un pignon de 14 qui fait 6 tours 3/7 pour 1 de la roue 90.
2e roue. . . . . 84 engrène dans un pignon de 8 qui fait 10 tours 1/2 pour 1 de la roue 84

60

$\frac{90}{6}$ 14 — 6 tours $\frac{6}{14}$ — 6 tours 3/7   4 2/7 — 4/14.

3 . . . 3/14.

$\frac{84}{4}$ (8 — 10 tours $\frac{4}{8}$ — 10 tours 1/2   67 h 2/7 + 3/14 — 1/2, ou 67 h 1/2.

« La roue des minutes fait donc 67 tours 1/2 pour un de la première roue du poids ou du ressort, c'est deux jours 19 heures et 30 minutes que la première roue reste à faire une révolution (1).

(1) Ceux qui connaissent les fractions calculeront très-facilement ces révolutions; mais, comme il peut y avoir quelques personnes qui les ignorent, ou qui en ont perdu l'habitude, je m'arrêterai, dit Berthoud, à en rappeler ici l'idée. Je prends ce premier exemple; c'est 90 qu'il faut diviser par 14. Je place et fais la division à l'ordinaire; je trouve que 90 divisé par 14 donne 6, et qu'il reste 6 du dividende 90 que je place en avant du diviseur 14 en cette sorte (6/14) qu'on exprime par *six quatorzièmes*, lesquels il faut réduire en divisant le *numérateur* 6 (on appelle ainsi le nombre d'une fraction qui marque la quantité des parties fractionnaires que l'on calcule, et *dénominateur* le nombre qui indique en combien de parties l'unité du calcul est divisée; on peut ainsi exprimer *un pouce* par 1/12e de pied, etc.), en divisant, disions-nous le numérateur 6 et le dénominateur 14 par un nombre qui soit diviseur commun de l'un et de l'autre; ce nombre est ici 2 : ainsi, 6 divisé par 2 donne 3, et 14 divisé par 2 donne 7; la fraction 6/14es se réduit donc à celle 3/7es qui a la même valeur. Le pignon 14 fait donc 6 tours et 3/7es de tour pendant que la roue 90 en fait un. Je la place comme on voit dans le calcul figuré ci-dessus. Je divise pareillement la deuxième roue 84 par son pignon 8, ce qui donne 10 tours 1/2, que je place dessous le nombre trouvé ci-dessus. Je multiplie d'abord les 6 tours que fait le pignon 14 pour un tour de la première roue par 10, nombre de tours que la roue 84 fait faire au deuxième pignon 8 (négligeant pour le moment les fractions pour y revenir ci-après), ce qui donne 60.

Maintenant il reste à multiplier les fractions. Je multiplie le numérateur 3 de la fraction 3/7 par 10, nombre de tours du pignon 8 pour un de la deuxième roue, ce qui fait 30, que je divise par le dénominateur 7 de cette même fraction : je trouve 4 pour quotient, avec un reste qui est 2/7es. Je place ce quotient sous le produit déjà trouvé des 6 tours multipliés par 10; je multiplie pareillement 6, nombre des tours du pignon 14 pour un de la première roue, par le numérateur 1 de la fraction 1/2 : ce qui fait toujours 6, que je divise par 2, dénominateur de cette dernière fraction, et le quotient est 3 que je place dessous l'autre quotient 4 : j'additionne ces quantités et je trouve 67 2/7 qui est le nombre

« Actuellement, pour trouver le nombre de tours de cette première roue en quinze jours, il ne faut que réduire quinze jours en heures, ce qui donne 360 heures, qu'il faut diviser par 67 1/2, nombre d'heures que la première roue reste à faire un tour; on trouvera qu'il faut qu'elle fasse 5 tours et 45/135, ou 5 tours 1/3 juste pour aller quinze jours; mais, comme il convient que la Pendule marche quelques jours de plus, le ressort, qui se rendra toujours plus ou moins, devra produire d'abord 7 tours, et même 7 tours et 1/2.

« Voilà donc le temps que marchera cette partie du rouage sans être remontée; il faut à présent trouver le nombre de tours de la roue d'échappement pendant un tour de la roue des minutes.

« La roue des minutes a 78 dents, elle engrène dans un pignon de 7; ce pignon porte la quatrième roue qu'on appelle toujours *roue de champ*, vu sa situation, et quoiqu'elle soit plate; cette roue de champ donc a 76 dents et engrène dans un pignon de 7 qui porte la cinquième roue, celle d'échappement, dont il s'agit de trouver le nombre de tours en une heure; après quoi on trouvera le nombre de dents qu'il faudra mettre à cette roue pour produire avec un pendule donné le nombre d'oscillations qui est naturellement propre à sa longueur.

3e roue de min., 78 dents, engr. avec pignon de 7 auquel elle fait faire 11 tours 1/7.
4e roue *de champ* 76 id. 7 id. 10 tours 6/7.

	110
$\frac{78}{1}$ (7 — 11 tours 1/7.	1 3/7 — 21/49.
	9 : 3/7 — 21/49.
$\frac{76}{6}$ (7 — 10 tours 6/7.	. . . . 6/49.
	120 tours. . . . 48/49.

de tours que fait la troisième roue et son pignon de 8 pour un tour de la première : s'il s'agissait d'un calcul qui exigeât une plus grande précision, il faudrait encore multiplier la fraction 3/7 par la fraction 1/2, ce qui se fait en multipliant le numérateur 3 par le numérateur 1, ce qui fait toujours 3, qui sera le numérateur de la nouvelle fraction cherchée; et en multipliant le dénominateur 7 par le dénominateur 2, ce qui fait 14 : la troisième roue et son pignon 8 font donc 67 tours 2/7, plus 3/14mes pour un tour de la première. Enfin on peut encore réduire ces deux fractions en une seule de la même valeur : pour cet effet, je multiplie le numérateur 2 (2/7 + 3/14 = 28/98 + 21/98 = 49/48 = 1/2) de la première fraction par 14 dénominateur de la seconde, ce qui donne 28, lequel sera le numérateur d'une nouvelle fraction; je muliplie ensuite le dénominateur 7 de la première par le dénominateur 14 de la seconde, ce qui donne 98, qui devient le dénominateur de la nouvelle fraction 28/98es, dont la valeur est la même que celle 2/7es, puisque le numérateur et le dénominateur sont multipliés par la même quantité 14; je multiplie ensuite le numérateur 3 de la seconde fraction par le dénominateur 7 de la première, et je trouve 98, qui est le dénominateur de la seconde fraction 21/98, laquelle a la même valeur que la seconde 3/14, étant multipliée par la même quantité 7 : voilà donc ces deux fractions, 2/7 et 3/14, changées en celles-ci 28/98 et 21/98, qui ont la même valeur que les premières, et ont de plus un dénominateur commun; il ne faut plus que faire l'addition des deux numérateurs et l'on aura 49/98es, fraction égale à celle 1/2, et dont le dénominateur est 98. Ainsi la valeur des deux fractions réunies 28/98 et 21/98, est 49/98, qui est égale aux deux précédentes 2/7 plus 3/14. Voilà en gros les opérations que l'on emploie communément dans le calcul des fractions, opérations qui sont nécessaires pour différents calculs de rouages et autres. Je ne me suis arrêté qu'à ce qui était relatif à cet ouvrage; mais cet exemple pourra suffire pour donner une idée des fractions, ou pour la rappeler au besoin : ainsi on pourra appliquer ces méthodes à tous autres exemples et sujets, quelle que soit la nature des fractions, ce qui ne change point la manière d'opérer. (*Nous doutons que cette leçon de Berthoud soit suffisante.*)

« Le rochet fait donc 120 tours, plus 48/49es, par heure, ce qu'on peut estimer à très-peu près à 121 tours. Reste à trouver le nombre de dents du rochet, ou roue d'échappement.

1387. « Si l'on veut que ce rochet fasse osciller un pendule de 12 pouces, par exemple, il faut chercher dans la Table des longueurs du pendule (fin du 1er vol.) celle d'un pied, qu'on ne trouvera pas positivement, parce que ces longueurs sautent, comme on l'a dit, de plus ou moins d'une ligne; mais on y trouvera pour longueur la plus approchante celle de 11 pouces 11 lignes 86, qui est plus courte qu'un pied de 14/100es de ligne (très-près d'un 7e de ligne). On trouvera qu'un pendule simple de cette longueur fait naturellement 6,300 oscillations. Or on a vu que chaque dent de la roue d'échappement produit 2 oscillations; ainsi chaque tour du rochet produira en oscillations le double du nombre de ses dents : le rochet faisant, comme ci-dessus, 121 tours par heure, le double de ce nombre sera 242, par lequel il faudra diviser 6,300; on aura au quotient 26, nombre le plus approchant qui convienne à cette roue d'échappement. Pour s'assurer de l'exactitude de l'opération, on multipliera 121 par 52, double des dents du rochet; on aura au produit 6,292 pour le nombre d'oscillations qu'un tel rouage et un tel pendule puissent produire pour approcher le plus, par les mesures, de 6,300 oscillations, le retard n'étant que de 8 oscillations par heure, dont il faudra raccourcir le pendule par l'écrou ou par la suspension, en achevant de régler sa longueur au plus près par l'expérience, qui peut seule atteindre ces quantités minimes. Comme on ne peut pas faire de roue qui ait une fraction de dent, quand le calcul la produit, il faut nécessairement, ou retrancher la fraction du calcul qui exigerait celle d'une dent, ou bien ajouter l'unité entière en place de la fraction, et par suite compléter l'unité d'une dent en mettant cette dent de plus, suivant ce qui diffère le moins du calcul fractionnaire trouvé. D'ailleurs la fraction de temps voulue par le calcul, s'établit naturellement par le réglage de la longueur du pendule, *tenu d'abord un peu plus long.* »

Trouver la durée de marche d'une Montre ordinaire avec le nombre de ses vibrations par heure.

1388. *Nota.* Cette méthode générale, employée ici pour un ancien mouvement de 14,400 vibrations, étant également applicable à ceux d'aujourd'hui de 18,000 ou à d'autres quelconques, et avec la même facilité, nous avons cru devoir rapporter encore l'article suivant de Ferdinand Berthoud.

« C'est, dit Berthoud, par des méthodes semblables à celles dont je viens de me servir que l'on trouvera le temps de la marche d'une Montre, ou de toute autre machine. J'en ferai donc seulement l'application au cas suivant : soit le rouage de la Montre vu dans la planche (voy. le rouage, pl. IV, fig. 1 et 4 de notre premier volume, uniquement pour fixer l'attention, mais non pas pour ses chiffres de renvoi relatifs à une description des art. 52 et suiv., il ne faut donc calculer que les nombres rapportés ici du texte de Berthoud); on veut savoir combien il faut que la roue de fusée fasse de tours pour que la Montre marche 30 heures, et quel est le nombre de vibrations qu'elle bat par heure. *Nous réglerons d'abord, comme préalable, la durée de marche.*

« La roue de fusée, étant supposée avoir 54 dents, engrène dans un pignon de 12 ailes qui porte la grande moyenne ou des minutes, faisant un tour par heure et portant 60 dents : on sait que c'est sur la *longue tige* de cette même roue du centre que s'ajuste la chaussée de minutes sous le cadran (pointillé ici en dessous du profil); la roue de minutes fait donc 4 tours 1/2 pour un de la roue de fusée; ainsi, en divisant par 4 1/2 le nombre 30 heures, qui est le temps de la marche de la Montre sans remonter, avec ce nombre de tours de la fusée en 30 heures, on trouvera que la première roue et sa fusée doivent faire 6 tours 2/3 (il s'agit d'une cage très-haute). Passons aux vibrations :

« La grande moyenne de 60 dents engrène dans le pignon de 6 ailes qui porte la petite moyenne de 48 dents ; celle-ci engrène dans le pignon suivant de 6 ailes qui porte la roue de champ de 42 dents, laquelle engrène dans le pignon de 7 de la roue de rencontre portant 15 dents. On peut disposer ce calcul comme il suit :

La roue grande moyenne de 60 dents	engrène avec un pignon de	6	et lui fait faire	10 tours.
La roue petite moyenne de 48	id.	6	id.	8 tours.
			produit. . .	80 tours.
La roue de champ de. . . 42	id.	7	id.	6 tours.
			tours de la r. d'échap.	480
La r. de renc. ou d'échap. 15,	dont le double donne par tour.			30 vibr.
			Produit final. . .	14,400 vibr.

Ainsi cette Montre, avec les nombres ci-dessus, va 30 heures, et son balancier doit battre 14,400 vibrations par heure; sa fusée fait 6 tours 2/3 pour les 30 heures, mais elle ne dévide pour 24 heures que 5 tours 1/3 de sa chaîne. Le ressort doit faire 7 tours dans le barillet, pour ses 30 heures, afin d'avoir 2/3 de tour d'armure et un tour de reste dans le haut, conditions possibles dans ces Montres qui exigeaient moins de force, et, étant très-hautes de cage, permettaient un ressort d'autant plus mince et plus élastique. Le contraire a lieu très-désavantageusement dans les Montres plates. »

Calcul du rouage d'une Montre à 18,000 vibrations par heure, dont la roue de champ ou deuxième petite moyenne peut porter une aiguille battant les 5es de seconde.

1589. La pl. IV, qui représente le mouvement amplifié de cette pièce, est la même à laquelle nous venons de supposer les nombres du texte de Ferdinand Berthoud. Les fig. 1, 2, 3 sont le calibre d'un diamètre double de l'exécution; mais il est réduit à sa vraie dimension dans les calibres au simple trait des fig. 5, 7, 8. La fig. 4 n'est qu'un développement du rouage supposé sur une seule ligne pour y reconnaître la hauteur respective des mobiles. Le coq ne pourrait dans l'exécution être placé ainsi sur le bord des platines, etc. Mais les autres figures de grandeur naturelle rétablissent la vraie distribution du plan ou calibre. *Cinq tours de ressort donnent ici trente-deux jours de marche.*

Nous employons dans ce calcul les nombres mêmes du rouage qui, dans la gravure, accompagnent chaque mobile. La fusée sans numéro peut porter 5 pas et 1/2 de chaîne, et sa roue avoir 70 dents; elle engrène avec le pignon du centre de 12 ailes, porté comme d'ordinaire par sa roue de minute de 75 dents; cette roue de minute ou grande moyenne

engrène avec le pignon de 10 de la petite moyenne de 64 dents; celle-ci engrène avec le pignon de 8 porté par la roue de champ de 60 dents; la roue de champ engrène avec le pignon de 6 de la roue de rencontre, laquelle porte 15 dents.

Nous prendrons ici, comme la plus récente, la méthode de multiplier le *solide* des roues (produit de leurs multiplications successives) par le *solide* des pignons, et nous diviserons le premier produit des roues par celui des pignons, pour avoir le nombre des vibrations; les 15 dents de la roue d'échappement sont prises pour 30, puisque chaque dent produit deux vibrations. *On ne doit calculer ici qu'à partir du centre.*

Ainsi les quatre roues 75×64×60×30, produisent comme *solide* (1). . 8,640,000.

Les trois pignons 10×8×6, produisent pour *solide*. 480,

nombre par lequel il faut diviser le solide des roues; l'on aura pour quotient. 18,000

vibrations par heure, que produira ce rouage, avec une roue de rencontre.

Nous ne rapportons cette méthode que pour varier l'application du calcul; on aurait pu y employer également l'une quelconque des précédentes, et même d'autres nombres; aussi la roue de fusée n'en porte-t-elle point d'assigné dans la figure.

1390. Ce calibre n'a été donné au commencement de cet ouvrage que comme une première amélioration de l'ancien calibre à roue de rencontre esposé dans l'*Essai* de Ferdinand Berthoud, ainsi qne nous l'avons expliqué en son lieu (art. 48, pag. 138 du t. Ier); il est encore susceptible d'être beaucoup plus perfectionné; il peut déjà porter une aiguille de secondes placée sur le pivot prolongé de la roue de champ. Mais on peut faire mieux: 1° y adapter l'échappement à cylindre et à repos que nous allons bientôt décrire à quelques pages plus loin, en supprimant ainsi l'engrenage de roue de champ; 2° on peut alors supprimer la fusée et sa chaîne au moyen d'un barillet denté qui permet à la Montre de marcher pendant le remontage sans complication d'aucune autre pièce; 3° on peut enfin changer avantageusement les nombres du rouage, pour y avoir des engrenages qui n'arc-boutent pas avant le centre, sauf le dernier pignon de 8, qui arc-boutera infiniment peu, au moyen de la modification que nous avons suffisamment conseillée dans nos articles d'engrenage.

On peut pourvoir diversement à ces derniers articles, comme en donnant 96 dents au barillet, dont un des tours en fera faire 8 au pignon du centre: le barillet restera 8 heures à faire une révolution, et trois tours de barillet feront marcher la pièce 24 heures; les 4 tours du barillet produiront 32 heures. Le ressort faisant 6 tours, il pourra avoir un tour d'armure et un tour de reste. Il sera d'autant moins forcé, que, n'ayant plus besoin d'autant d'épaisseur que pour une fusée, il en sera d'autant plus élastique et moins exposé à se rompre ou à se rendre.

La roue du centre pourra avoir 80 dents, produisant 8 tours du pignon de 10 de la petite moyenne, qui, ayant alors 75 dents, produira 7 tours 1/2 du pignon de 10 aussi de la deuxième petite moyenne remplaçant la roue de champ; cette dernière fera ainsi 60 tours pour un de la roue du centre ou des minutes. Cette même roue de secondes peut

(1) Voyez en arrière la note 1, page 321, au sujet de l'expression : *solide* des roues ou des pignons.

porter 80 dents engrenant avec un pignon de 8 mis à la roue de cylindre ; chaque tour de la roue des secondes fera faire 10 tours à celle d'échappement de 15 dents, dont il passera sur le cylindre 150 dents par minute ; et, chacune de celles-ci produisant deux vibrations, il y en aura 300 par minute, qui, divisées par 60, donneront 5 battements par seconde. On peut aussi varier ces nombres d'autre manière.

Si l'on veut remplacer la petite platine par des ponts pour chaque mobile, on aura le calibre moderne de *Lépine*. L'habitude de la construction vulgaire fera d'abord paraître ces dentures bien fines, ainsi que les ailes de pignons aussi nombrés ; mais, la main-d'œuvre perfectionnée aujourd'hui, et la facture des pignons à l'outil n'étant plus si rares, on peut en tirer d'excellents résultats. Il ne s'agit pas ici de Montres de commerce, mais du perfectionnement permis actuellement par les progrès de l'époque ; il faut à l'ensemble une hauteur et un diamètre assez forts, bien que modérés.

Nous bornons ici le calcul des rouages ordinaires, comme suffisant pour des lecteurs pourvus des premières notions d'arithmétique. Au surplus, les nombreux ouvrages élémentaires de calcul pourront y suppléer. Quant aux pièces à 8 jours pour voyage, elles peuvent être imitées d'après le calibre de notre Pendule moderne et des répétitions déjà données, sauf le nombre de première grande roue, l'échappement propre au balancier, etc.

1391. Nous avons dit assez souvent combien l'Horlogerie exige d'instruction mathématique et physique pour la solution d'une foule de difficultés qui ne sont résolues jusqu'ici que par l'expérience pratique, souvent encore incertaine, et que c'est sur ces parties trop peu connues que doivent se porter les efforts des artistes pour en établir ou perfectionner la théorie. Il faut donc aujourd'hui réunir la science à la pratique et au technique de cet art, susceptible encore d'importantes améliorations,

Quant aux ressources du calcul, nous devons signaler à plus d'un lecteur une méthode très-estimée et pratiquée par les savants, mais trop peu connue du grand nombre de ceux qui pourraient en faire usage. Nous voulons parler de la méthode des *logarithmes*, dont le nom épouvante la paresse d'esprit, tandis que leur usage, utile dans bien des cas, est extrêmement simple et aisé à pratiquer. Car il n'est pas nécessaire ici de savoir comment les tables de logarithmes sont formées, ni d'approfondir les combinaisons qui en font la base : il faudrait être habile arithméticien pour les bien saisir ; mais il suffit, et il est très-facile, de savoir se servir de ces tables de calculs tout faits, comme des négociants en détail se servent d'un *barême* pour trouver leurs *comptes faits*, sans bien connaître à fond la règle qui les produit. Donc, sans nous occuper du mode de construction de ces tables, basé sur la théorie des progressions géométriques et arithmétiques combinées, nous donnerons principalement divers exemples d'opérations qu'on n'aura besoin d'imiter que d'une manière pratique. Ce moyen est déjà aussi rapide, et surtout plus certain, que celui ordinaire des multiplications et divisions des nombres peu chargés de chiffres, qu'il faut recommencer en quelque sorte pour *faire la preuve*, laquelle souvent n'en est pas une. Mais il a de plus l'extrême avantage d'abréger prodigieusement le travail des multiplications et divisions qui nécessitent de longues colonnes de chiffres, en les réduisant à trois lignes, soit d'addition, soit de soustraction, qui sont les deux règles les plus simples et les plus

faciles. Nous pensons qu'en exposant la manière d'employer les logarithmes, et en appelant l'attention des artistes sur ce sujet important trop oublié, nous rendons un service aussi utile et aussi neuf dans un traité d'Horlogerie que celui qui résulte de la pratique régulière de l'engrenage donnée précédemment sur cette matière. Si nous commençons par quelques relations historiques, c'est pour justifier l'intérêt que nous appelons sur ce sujet.

DES LOGARITHMES.

1392. « La découverte des logarithmes, dit d'*Alembert*, est due à *Néper* ou *Napier*, « baron écossais, en 1614. Stifelius, arithméticien allemand, avait déjà remarqué la pro- « priété fondamentale de cette méthode : que *le logarithme du produit de deux nombres* « *est égale à la somme de leurs logarithmes ;* mais ce fut une observation stérile jusqu'à « l'époque où *Néper* sut l'employer à abréger prodigieusement les opérations du calcul « numérique ordinaire. » Avant cette invention, pour calculer ou représenter par des rouages les mouvements astronomiques, on employait des années à obtenir avec la voie ordinaire une solution qui, en usant de la *propriété* logarithmique, exigerait à peine un jour entier.

On ne doit pas attacher au mot *propriété* des nombres les idées superstitieuses et mystiques du moyen âge si longtemps propagées, ni celles attribuées à l'école de Pythagore, et qui pouvaient être des allégories couvrant un sens philosophique. Ce que nous nommons ici propriété résulte nécessairement des valeurs attachées aux signes et à leur ordre de position dans notre système de numération ; ce système n'est lui-même qu'une des combinaisons possibles du *calcul*, et l'on aurait pu en adopter un autre, comme le calcul binaire proposé par *Leibnitz* et qui n'emploierait que deux chiffres, ou le système *duodécimal* proposé par d'autres, et qui ajouterait deux chiffres à ceux que nous employons ; alors les propriétés de quelques nombres de se représenter après certaines séries seraient changées, et il en naîtrait d'autres d'une marche différente ; ce qui prouve que ces propriétés ne résultent que des combinaisons convenues, dans l'origine du premier choix, ou de l'usage qu'on en a fait. Notre système a quelques imperfections, mais les autres ont aussi leurs inconvénients ; les nombreuses combinaisons possibles de celui que nous employons ont donné souvent des résultats curieux et frivoles, tels que les *carrés magiques*, ou autres rapprochements singuliers et bizarres ; mais il s'en rencontre aussi qui peuvent fournir à des esprits observateurs et savants de nouvelles vues mathématiques.

C'est ainsi que, dans notre système de numération, l'usage des logarithmes est basé sur les propriétés combinées des *progressions géométriques et arithmétiques*, qui contiennent aussi la raison des diverses *règles de proportion*. La construction des tables de logarithmes exige néanmoins des opérations fort compliquées ; nous en exposerons seulement l'usage, leur explication n'étant pas de nature à trouver place ici ; les amateurs pourront la trouver développée ailleurs.

1393. En citant la sphère de *Passemant*, feu *Antide Janvier* rapporte que l'auteur de cette machine employa plus de vingt ans aux calculs de ses révolutions célestes : « Il n'é-

« tait pas, dit-il, dans la bonne voie; car, avec les procédés mathématiques, en supposant « même qu'il n'eût pas l'habitude du calcul, il pouvait faire ce travail en huit jours. » Janvier, né dans les montagnes du Jura, fit remarquer, étant encore très-jeune, son habileté dans la *représentation des mouvements célestes par le mécanisme des rouages;* il ne fut pas seulement initié dès lors au calcul ordinaire, mais il acquit encore des notions suffisantes de mathématiques et d'astronomie. Dans ses dernières compositions de ce genre, il employa avec succès la méthode abréviative des logarithmes, qu'il ne connaissait pas d'abord. C'est ainsi qu'il lui a été si facile d'essayer un grand nombre de combinaisons, que les moyens ordinaires auraient rendues trop longues, et qu'il a pu choisir parmi les révolutions possibles des mobiles, celles qui, simplifiant le plus ses rouages, approchent mieux de la marche observée des corps célestes. On ne peut, en définitive, représenter les révolutions astronomiques, toujours fractionnaires, que par des approximations; mais celles-ci peuvent ne différer de ce qui est connu et admis dans la science que de quantités presque insensibles, même après un très-long temps, comme en effet Janvier y est souvent parvenu.

1394. A l'occasion de l'un de ces longs calculs, mais fait suivant les moyens vulgaires par l'auteur que nous citons, il remarque ce qui suit : « Nous serions arrivé plus promp- « tement à ce résultat, dit-il, par des procédés qui ne sont pas assez généralement connus, « même des plus habiles ouvriers; nous n'avions qu'à prendre dans les tables le loga- « rithme du *solide* des roues, en soustraire le logarithme du *solide* des pignons, et le reste « nous eût donné le logarithme du quotient!... Cette opération est bien plus expéditive, « et l'on n'a jamais assez de temps, lorsqu'on aime à l'employer utilement; combien j'en « ai perdu avec les calculs purement arithmétiques! Quel instrument précieux *Néper* a « mis entre les mains des calculateurs! Ah! si *Képler* avait eu cette ressource, aurait-il « passé cinq ans à établir la théorie de *Mars?* un seul exemple de ses calculs remplirait-il « dix pages in-folio? » Nous avons déjà mentionné cette remarque de Janvier; mais nous la répétons ici comme corroborant les autres articles, et dans l'espoir d'éveiller l'insouciance de ceux qui négligent cette ressource si utile dans bien des cas.

Tout en faisant ainsi l'éloge de cette méthode, l'auteur s'est borné à proclamer les avantages qu'il en retirait; il eût été à désirer qu'il eût mis ce calcul à la portée des artistes de son temps par des exemples élémentaires; mais il savait que cet étalage isolé d'un calcul mathématique inconnu dans les ateliers n'en effrayerait que plus la routine; il connaissait la puissance de l'habitude des moyens vulgaires. C'est avec cette assurance de n'être pas imité qu'il dit encore dans un autre paragraphe : « C'est toujours un nouveau sujet « d'étonnement pour moi de voir que toutes les Pendules à phases de lune donnent une « erreur de trois quarts d'heure par mois, tandis que, si MM. les horlogers voulaient s'en « donner la peine, ils obtiendraient une approximation de cinq à six secondes avec deux « roues et deux pignons. » Mais, au lieu d'exposer trop sèchement une seule partie des calculs qui atteignent ce résultat, il aurait fallu en détailler l'application de manière à se faire comprendre des ateliers, et bien des gens pensent que c'est ce que l'auteur ne voulait pas.

1395. Il est même arrivé qu'en essayant d'appliquer les calculs que Janvier indique trop succinctement dans ses Mémoires des artistes sont tombés dans l'erreur, parce qu'ils y étaient sans détails explicatifs, suivant peut-être le but secret de l'auteur ; car celui-ci, dans une note de l'un de ses articles, entreprend de se disculper, comme il suit, d'une erreur de Ferdinand Berthoud relative à la description d'une machine de Janvier dans l'*Histoire de la mesure du temps* : « Berthoud, dit-il, fait engrener les *facteurs d'un même* « *solide* les uns dans les autres, et cette faute, commise sans doute par inadvertance, m'a « attiré plus d'un reproche ; mais suis-je coupable de déception parce qu'on aurait déna- « turé une simple règle d'arithmétique, ou qu'on ne saurait pas faire une *règle de trois* ? » Cette dernière imputation, que ne méritait certainement pas Berthoud, paraît dirigée plutôt contre un autre artiste en vogue, mais peu éclairé, qui se plaignait d'avoir suivi de faux nombres de Janvier, ce qui aurait pu arriver verbalement, mais non par écrit. Quant aux Mémoires imprimés, il fallait que leur peu d'explication fût au moins exact, parce qu'ils pouvaient passer sous les yeux des géomètres ; mais il suffisait peut-être à l'auteur qu'ils ne fussent pas assez intelligibles dans des ateliers renommés dont il connaissait la portée, et l'on doit convenir qu'en ce sens son adresse lui aurait assez complétement réussi.

1396. Le même auteur dit ailleurs, en parlant de révolutions astronomiques par l'Horlogerie : « Il faut avoir plus de connaissance des mouvements célestes que n'en possèdent « ordinairement les meilleurs artistes horlogers pour être certain de réussir dans la com- « position de pareils ouvrages, et je doute fort que ceux qui s'en occupent y gagnent « beaucoup de gloire et qu'ils y fassent le moindre profit ; car je sais mieux que personne « que ce n'est pas avec des machines de ce genre qu'on arrive à la fortune. »

Quoique cette sorte de travaux, employant beaucoup de temps et occasionnant plus de dépenses, soit aujourd'hui peu recherchée et par suite peu lucrative, l'auteur qui s'en plaint ici a dû principalement la position malheureuse dans laquelle il a passé une grande partie de sa vie, et surtout ses dernières années, à son caractère à la fois ambitieux et caustique, et à des faiblesses que l'on ne soupçonnerait pas dans un homme probe et instruit. Les vrais amateurs et appréciateurs ont toujours regretté de voir tant de talent naturel et d'instruction si facilement acquise avoir eu aussi peu de succès ; le possesseur de ces facultés a joui d'une réputation méritée, mais sans qu'elle produisît rien pour son aisance personnelle. Il était certes bien plus capable que des contemporains qui ont joui d'une grande vogue et d'une fortune proportionnée, parce qu'ils savaient ménager habilement les esprits, profiter de la faveur et de la prévention générales, quoique en grande partie elles fussent mal fondées ; mais, si avec des talents réels on néglige et détruit par son caractère la bienveillance qu'ils font naître naturellement, on se trouve aisément éclipsé par l'intrigue et la jalousie, et le mérite réel est trop souvent négligé. Si feu Janvier, du reste, ne se fût pas attaché exclusivement aux effets astronomiques, il est probable qu'il aurait plus contribué aux progrès de *la mesure exacte du temps* que ne l'ont fait ceux qui, sans dispositions réelles, mais plus adroits dans leur conduite, parvinrent à le faire oublier. Janvier, s'occupant presque exclusivement des combinaisons de rouages et des calculs astronomiques, a laissé l'art de l'Horlogerie au point où il l'a trouvé ; il a employé les

perfectionnements connus de son temps, sans chercher à les augmenter encore, comme ses rares facultés auraient pu le faire espérer s'il en avait dirigé l'application dans ce sens.

1397. Les productions de cet artiste étaient nécessairement d'un prix qui ne pouvait être atteint que par la richesse des curieux, et elles ont été par suite peu répandues. Mais quelqu'autre rival ignorant et jaloux, tout en affectant habilement l'insouciance et la modestie, a su profiter de sa position, comme des irrégularités de Janvier, pour jeter de la défaveur sur son genre de talent, et cette défaveur établie dans les salons a pu même s'introduire jusque dans les académies. Il n'en est pas moins vrai que les compositions de ce genre, quoique moins recherchées aujourd'hui (et sans les causes ci-dessus on ne saurait pas trop pourquoi), ne laissent pas d'offrir un vif intérêt, en plaçant sous les yeux de l'amateur et du connaisseur le tableau, soit de telle révolution céleste, soit même l'ensemble général de notre système planétaire; leurs mouvements, rendus à volonté plus rapides et par là plus palpables, en établissent bien plus clairement la réalité dans l'esprit que les figures immobiles et confuses des planches, ou les raisonnements et calculs nécessaires pour les apprécier... *Segnius irritant animos, etc....*; et, quoi que disent même les académiciens, avec raison sous un rapport, de la nécessité d'un calcul spécial pour les observations, il n'est pas indifférent de pouvoir être prévenu approximativement par une machine de ce genre des résultats cherchés; d'ailleurs, si ce n'est pas pour l'utilité de la science, au moins pour ceux qui en ont le goût avec les moyens de l'appliquer, ce n'est pas une légère satisfaction d'avoir sous les yeux, en place de la nature dont l'immensité est pour nous si difficile à embrasser, une imitation habile qui en représente en petit les effets.

DE L'USAGE DES LOGARITHMES.

1398. Il n'est pas nécessaire pour cet usage, nous l'avons déjà dit, de connaître la théorie de construction des tables. En se bornant à imiter les exemples d'application ci-après, on n'en opérera pas avec moins de sûreté.

Nous n'emploierons dans nos exemples que les deux premières pages des tables, ces deux pages n'étant pas dépassées par les nombres sur lesquels nous allons opérer. On les trouvera à la suite de ces articles, où elles produiront deux tableaux de la forme de ceux qui donnent, à la fin du premier volume, les longueurs du pendule.

La multiplication ordinaire des nombres quelconques y est réduite à la simple addition de deux lignes de chiffres, dont le produit se trouve à la troisième ligne. La division n'exige de même qu'une simple soustraction en deux lignes de chiffres, dont l'inférieure est soustraite de la supérieure, et dont le quotient est produit par la troisième ligne. L'addition et la soustraction sont, comme on le sait, les deux opérations les plus faciles de l'arithmétique.

L'élévation d'un nombre à son *carré*, ou à son *cube*, ou à d'autres puissances, se réduit à la simple multiplication du logarithme de ce nombre, par 2 pour le carré, par 3 pour le cube, ou par un autre nombre exprimant ainsi la puissance.

L'extraction des *racines* carrées ou cubiques se réduit de même à la simple division du logarithme du nombre donné par 2 ou par 3, ou par un autre nombre de la puissance.

Ces dernières multiplications ou divisions donnent peu de travail, parce que le multiplicateur ou le diviseur ne sont d'ordinaire composés que d'un ou deux chiffres (1).

Exemples de divers calculs par les tables de logarithmes.

MULTIPLICATION.

1399. Pour trouver le produit de deux nombres par la multiplication de l'un par l'autre, on cherchera le multiplicande dans la colonne N des nombres naturels de la table, et l'on écrira son logarithme, qui se trouve à la droite du lecteur; on cherchera de même le multiplicateur dans cette même colonne des nombres, et l'on écrira son logarithme audessous du logarithme précédent, chiffre pour chiffre; on additionnera les deux logarithmes, et leur somme totale, formant une troisième ligne, sera cherchée dans les colonnes des logarithmes, où elle indiquera à gauche, sur la même ligne, dans la colonne des nombres naturels, le produit demandé.

Exemple : Pour avoir le produit de 15 multiplié par 13, on cherchera 15 dans la colonne

(1) Nous ajouterons ici très-peu de remarques sur ces tables. Ceux qui désirent prendre quelque idée de leur théorie consulteront *Camus*, *Lalande*, M. Midy dans son Arithmétique réduite à l'addition, les Leçons d'arpentage de M. Boichoz, vérificateur spécial du cadastre, page 119 et suiv., etc.

Le nom de *Logarithme* est formé des deux mots λόγος, *discours*, ἀρίθμος, *nombre*, parce que les Logarithmes indiquent ou *disent* les *nombres demandés*. Le mot français : *indicateur*, remplacerait peut-être aussi bien un nom grec, qui effarouche la paresse. Mais on ne doit considérer ici que l'avantage d'une méthode simple, facile et rapide, qui devrait être plus répandue.

Pour le simple usage des tables, qui ne nécessite point la connaissance de leur construction, il sera plus simple et plus facile de s'en instruire auprès d'un mathématicien capable, qui, en peu de mots, résoudra les difficultés qui arrêtent presque toujours ceux qui commencent.

On se procurera d'abord les petites tables in-18 de *Lalande* stéréotypées par *Firmin Didot*, et du prix de 2 à 3 fr., dont les nombres *naturels* arrivent à 10,000. On apprendra ensuite à se servir des mêmes tables pour les nombres qui les dépassent; les Logarithmes y portent 6 chiffres, y compris la caractéristique séparée par un point, et qui ne sert, le plus souvent, qu'à faire retrouver plus aisément les Logarithmes. Quant aux grandes tables de *Callet*, stéréotypées par le même *Didot*, elles vont jusqu'à 108,000.

Les Logarithmes moindres que 10 ont 0 pour caractéristique; ceux de 10, à 99, ont 1 pour caractéristique; ceux de 100 à 999 ont 2, etc. Généralement la valeur du chiffre caractéristique est inférieure d'une unité au nombre naturel de chiffres de la somme que l'on a, et à l'égard de laquelle on veut opérer. Nous entendons par le nombre de chiffres la quantité des chiffres qui énonce cette somme, et non pas la valeur de cette somme.

Dans les grandes ou petites tables, la colonne qui porte en tête la lettre N contient les nombres dits *naturels*, ceux pour lesquels il s'agit d'opérer; et aussi, qu'il faut définitivement obtenir. La colonne qui porte en tête Log. contient les Logarithmes de ces nombres naturels. Mais nous en resterons là pour ne pas empiéter sur l'instruction d'un bon professeur, qu'il faut consulter.

des nombres naturels de notre table à 7 chiffres décimaux; on trouvera à droite le logarithme de 15, que l'on écrira comme il suit; 1.1760913
On opérera de même pour le logarithme de 13, qui est. 1.1139434

En additionnant ces deux logarithmes, on aura le produit . . . . 2.2900347, ou 6.

On cherchera ce produit dans les colonnes des logarithmes, et l'on trouvera à la gauche, sur la même ligne, dans la colonne des nombres naturels, 195, produit de 15 multiplié par 13, évidemment conforme au produit du calcul ordinaire.

Ici les nombres naturels étant composés de deux chiffres, la caractéristique est 1, séparé par point ou virgule des autres chiffres, qui sont décimaux. Le dernier logarithme à chercher avait déjà 2 pour caractéristique, donné par l'addition des deux caractérisques 1; aussi ce logarithme a-t-il été trouvé dans la série 2 des caractéristiques.

Dans les tables que nous donnons, le dernier chiffre du troisième logarith. est 7 au lieu de 6, pour la raison expliquée ci-après; du reste la différence est imperceptible, étant l'unité d'une décimale du septième ordre, qui n'exprime que des 10,000,000es. C'est que nos nombres sont tirés d'une autre table qui comporte plus de chiffres décimaux; alors, dans la table réduite, on augmente d'une unité son dernier chiffre, pour suppléer à la valeur des derniers chiffres décimaux qui n'y sont pas exprimés.

Nota. Lorsque l'on n'opère que sur de petits nombres, comme ceux que nous avons supposés ici, pour simplifier cet exemple et ne pas sortir des deux premières pages, la méthode arithmétique ordinaire est souvent aussi prompte; mais c'est lorsqu'il s'agit de chiffres nombreux sur la même ligne, et qui exigent de très-longues colonnes dans le prolongement en contre-bas de l'opération, que la méthode des logarithmes devient presque incomparablement plus abréviative et d'autant moins sujette à l'erreur; et, pour s'habituer à l'usage des tables, il est avantageux de s'en servir même pour des nombres peu élevés.

EXEMPLE DE DIVISION.

1400. Pour avoir le quotient d'une division, on soustraira le logarithme du diviseur du logarithme du dividende, et le reste sera le logarithme du quotient; en cherchant ce dernier logarithme, on trouvera à gauche, colonne des nombres naturels, le quotient demandé.

Ainsi, en nous servant des mêmes nombres que ci-dessus : Pour avoir le quotient de 195 divisé par 13, on prendra le logarithme de 195, qui est. . . . 2.2900346, ou 7.
et le logarithme de 13, qui est. . . . . 1.1139433, ou 4.

En soustrayant le second nombre du premier, il restera 1.1760913

On cherchera ce dernier logarithme dans la table, et l'on aura à gauche le nombre 15 pour quotient de 195 divisé par 13.

RÈGLE DE PROPORTION, DITE RÈGLE DE TROIS.

1401. Pour avoir le quatrième terme d'une règle de trois on ajoutera le logarithme du second terme au logarithme du troisième terme, et de leur somme on retranchera le loga-

rithme du premier terme; le reste sera le logarithme du quatrième terme cherché. Ce dernier logarithme trouvé dans la table indiquera à gauche le terme demandé.

Soit la proportion ou règle de trois suivante ; 125 : 150 :: 165 : x (x représente la quantité inconnue ou demandée).

On prendra pour le second terme 150 son logarithme, qui est . . . 2.1760913
On prendra pour le troisième terme 165 son logarithme, qui est . . 2.2174839

On les additionnera pour en avoir la somme, ci. 4.3935752
On soustraira de ce produit le logarithme du premier terme 125, qui est . 2.0969100

On aura pour logarithme du quatrième terme le reste, qui est 2.2966652

Ce dernier logarithme, cherché dans la table, donnera à côté le nombre 198 pour le quatrième terme demandé, ou l'*inconnue x*. La règle de trois veut 2 lignes de plus.

EXEMPLE POUR ÉLEVER UN NOMBRE A SON CARRÉ.

1402. On multipliera par 2 le logarithme du nombre proposé (2 exprime le carré ou la seconde puissance d'un nombre, la première puissance étant le nombre lui-même).

Soit le nombre 11 (onze) dont on veut avoir le carré. On prendra le logarithme de 11, qui est 1.0413927
Ce logarithme étant multiplié par 2

donnera. 2.0827854

Ce dernier logarithme cherché dans la table donnera à côté le nombre 121 pour le carré du nombre 11. C'est onze fois onze, puisque le carré d'un nombre est le produit de ce même nombre multiplié une fois par lui-même.

TROUVER LE CUBE D'UN NOMBRE.

1403. On multipliera le logarithme du nombre proposé par 3, qui exprime le cube ou la troisième puissance d'un nombre, et le produit sera le logarithme du cube du nombre proposé.

Soit donc demandé le cube de 5, dont le logarithme est 0.6989700
En multipliant ce logarithme par. 3

On aura pour logarithme du cube demandé, le produit 2.0969100

Ce dernier logarithme, cherché dans la table, donnera à gauche, colonne des nombres, celui de 125 pour le cube demandé.

Si l'on demandait ainsi le produit de la quatrième, de la cinquième puissance d'un nombre, il est évident qu'il faudrait multiplier ce nombre par lui-même autant de fois (moins une, puisque le nombre simple est la racine déjà comptée pour première puissance).

EXTRAIRE LA RACINE CARRÉE D'UN NOMBRE.

1404. Pour avoir la racine carrée d'un nombre proposé, on divisera par 2 le logarithme cherché de ce nombre, comme plus haut ; le quotient sera le logarithme de sa racine carrée.

Si l'on demande la racine carrée du nombre 121, on cherchera son logarithme qui est. 2.0827854

On prendra la moitié de ce logarithme en le divisant par 2

On aura le logarithme. 1.0413927

qui, cherché dans la table, donnera à gauche le nombre 11 pour la racine carrée de 121.

EXTRAIRE LA RACINE CUBIQUE D'UN NOMBRE.

1405. On divisera par 3 le logarithme du nombre proposé, et le quotient sera le logarithme de la racine cubique demandée, que l'on trouvera à gauche de ce dernier logarithme

Pour avoir, par exemple, la racine cubique de 125 (nous employons toujours les mêmes nombres déjà proposés, parce que les résultats se trouvent naturellement confirmés les uns par les autres, et nous avons choisi ces faibles nombres pour qu'il fût facile à chacun d'opérer autrement et d'y trouver, au besoin, la preuve de nos exemples), on cherchera dans la table le logarithme de 125, qui est. 2.0969100

et on le divisera par 3

en disant : le tiers de 2 ne se peut; et l'on place un 0, ci 0,6989700

reste 2; puis le tiers de 20 est 6 pour 18, reste 2 : on placera 6; ensuite le tiers de 29 est 9 pour 27, reste 2 : on placera 9, etc.

En cherchant dans la table le logarithme du nombre restant, on aura à gauche 5 pour racine cubique du nombre 125 proposé.

Si l'on veut avoir les racines 4e, ou 5e, ou 6e, etc., on divisera le logarithme du nombre proposé par 4, ou 5, ou 6, etc.

Et quand même les nombres cherchés iraient jusqu'à 100,000, l'opération ne serait ni plus longue, ni plus compliquée, ni plus chargée de lignes que les nombres très-bas que nous avons pris pour exemples, afin de ne pas sortir des deux pages de *spécimen*, à sept chiffres décimaux que nous donnons pour les opérations ci-dessus.

Les logarithmes sont susceptibles de servir à nombre d'autres applications, qu'il serait trop long d'exposer, et qu'il faut étudier dans les auteurs de ce genre.

1406. Au reste, si nous essayons de donner ici une idée première et fort restreinte de l'usage abréviatif des tables de logarithmes, nous avertissons que, dans d'autres cas, on peut se trouver arrêté par quelques difficultés; le plus court sera de s'adresser à un mathématicien capable, quoiqu'il ne s'agisse ici que de la pratique. Ensuite l'usage, de *bons avis*, et la méditation faciliteront l'intelligence de la théorie (1).

(1) Les grandes tables de *Callet* à 108,000, in-8° stéréot. de *F. Didot*, monument d'exactitude et de patience, sont du prix de 14 fr., mais, pour en user, il faut l'instruction spéciale recommandée. Les petites tables de *Lalande*, ayant 2 derniers chiffres décimaux de moins, peuvent servir, à quelques 10,000,000es près; mais les *rouages satellites* se prêtent à toute fraction, V. nos nos 784-85, et le Mém. de M. *Perrelet* à la Société d'encouragement.

Nota. Dans la pl. XXXVIII, fig. 2 et 1, le fuseau en P devait être partie en noir. Et un autre fuseau *p* ne devait pas avoir de noir dans sa ligne; mais cet avis suffira pour y suppléer.

1407. Il existe encore une autre méthode pour produire entre des mobiles dentés un nombre relatif de révolutions, et même avec telle fraction que l'on voudra, au moyen du transport d'un autre mobile autour de l'un des premiers déjà animé d'un mouvement connu. On sait déjà que cet artifice ingénieux fut pratiqué par d'anciens artistes de *Nuremberg*, et que son premier auteur est inconnu; que *Janvier* fait remonter cette invention à plus de trois siècles en arrière d'aujourd'hui, et cite à ce sujet une antique horloge donnée par le cardinal de *Granvelle* à la ville de Besançon, dans laquelle ce mécanisme était employé; qu'il dit en avoir fait usage lui-même depuis plus de 40 ans dans ses machines astronomiques; que le principe de cette disposition se retrouve aussi dans des cadratures déjà anciennes de pendules à équation, pour accélérer ou retarder le mouvement de l'aiguille solaire du temps vrai et inégal, sans interrompre la marche uniforme du temps moyen, et qu'enfin ce système a été renouvelé récemment sous le nom de *rouages satellites* par un artiste très-intelligent. Or, ce moyen de modifier la vitesse des mobiles pour produire des révolutions fractionnaires à volonté, n'est pas très-facile à saisir, et exige assez de méditation; dans un établissement alors renommé de Paris, on ne parvint même pas à le bien comprendre, malgré l'aide d'un mathématicien consulté. Néanmoins on pourrait le comparer approximativement à l'effet d'une vis qui aurait à chacune de ses extrémités un pas d'une progression connue, mais l'une étant différente de l'autre. Si l'un des écrous de cette double vis est fixe, et si l'écrou de l'autre bout de vis est mobile dans une coulisse, la tige filetée ne pourra tourner sans faire mouvoir plus ou moins l'écrou mobile, d'une quantité moyenne entre sa progression du filet dans l'écrou fixe, et celle différente de son autre filet dans l'écrou mobile. Ces deux quantités seront à soustraire l'une de l'autre, ou à additionner ensemble, selon la progression connue de chaque filet de vis, que le calcul n'aura plus qu'à apprécier, en supposant les bases ou les progressions exactement connues. Du reste, il n'est pas aussi facile de déterminer la progression exacte d'un filet de vis, qu'il l'est de diviser une roue suivant un nombre voulu; en outre, la longueur d'une vis s'épuise aisément, tandis que les révolutions des roues sont inépuisables, et cette comparaison n'offre ici qu'une simple analogie avec le calcul de cette sorte d'effets. Mais on approfondira mieux la question à l'aide d'un mémoire adressé il y a déjà quelques années à la Société d'encouragement, où cet effet fut complétement expliqué et démontré pour la première fois par M. Perrelet père, horloger à Paris. Quoique le rapport approbatif qui en a été fait, soit *noyé* en quelque sorte dans de nouvelles applications, ajoutées par le rapporteur, et ne tendant qu'à obscurcir la proposition, la solution publiée de cette méthode qui a tant embarrassé certaines gens, n'en appartient pas moins à l'auteur de ce mémoire; on le trouve dans le bulletin de la Société d'encouragement de Paris, pour le mois d'août 1823.

1408. *Nota.* Nous avons dû borner à l'exposition précédente de l'engrenage, et du calcul ordinaire des révolutions du rouage, ce que nous avions à dire sur ces deux sujets qui ont occupé beaucoup trop d'espace. Cependant, il y aurait encore bien des observations de détail à y ajouter, pour prévenir la négligence si commune dans cette partie importante. Mais, le lecteur étant sur la voie, son intelligence y suppléera. Nous ne quit-

terons pas néanmoins ce sujet sans y joindre un dernier mot qui le complète, en le rendant beaucoup plus simple que la longueur des explications ne l'a fait supposer. Nous rappellerons d'abord que cette méthode pratique éprouvée souvent et avec un plein succès, est beaucoup plus rapide dans son application, si l'on se borne à copier nos figures, ainsi que nous l'avons recommandé à ceux qui n'ont pas le temps de les tracer en grand suivant les principes.

Il s'agit dans tous les cas de considérer les deux mobiles qui s'engrènent, comme deux disques n'ayant que les flancs de leurs dents et *dépourvus uniquement* de leurs arrondis ou excédants, et dont les diamètres que nous appelons alors *primitifs* sont, entre eux, dans le même rapport que le nombre des dents de l'un avec le nombre des ailes de l'autre. Si, par exemple, la roue a 48 dents, menant un pignon de 8, il est clair que le nombre des dents de la roue contenant 6 fois le nombre des ailes du pignon, le diamètre *prim.* de la roue ou disque, sans ses excédants, devra être ou contenir 6 fois le diamètre primitif du pignon; il en est de même des rayons *prim.* Il ne reste donc plus qu'à ajouter aux deux mobiles, ces excédants ou vulgairement *arrondis.* On en a vu la règle directe et détaillée à l'article 1318; mais il sera plus court et facile d'établir dans la denture imitée, la même proportion qu'aux dents des fig.: on aura alors ainsi, suivant les nombres, le rayon total, ou le diamètre total de la roue et du pignon, *mais seulement après la réunion des excédants, aux diamètres, ou aux rayons primitifs.*

Du reste, on a vu que la courbe de l'excédant est plus cintrée avec les pignons de bas nombre, qu'avec ceux plus nombrés, comme l'indiquent les figures, et que, quant à l'excédant du pignon, il se forme d'ordinaire d'un simple demi-cercle dont la naissance, seule employée, ne diffère pas sensiblement de la courbe théorique voulue. Enfin, nous avons dit que si l'on trace sur les faces de toutes les dents le cercle *primitif* de la roue, en ce point qui joint les excédants aux flancs de ces dents, et de même sur toutes les ailes du pignon leur cercle primitif au point qui joint les flancs de ces ailes à leurs arrondis, il suffira de faire coïncider ensemble les cercles prim. de ces deux mobiles, sur la ligne des centres, dans la pénétration de l'engrenage, pour que celle-ci se trouve juste à son vrai point, et plus sûrement juste qu'avec le compas d'engrenage, où la douceur cherchée de la menée est précisément une cause d'erreur, car, suivant la théorie, elle ne se trouve pas être le vrai point voulu de pénétration pour l'uniformité de menée.

Voilà donc au fond tout le mystère de cette méthode, bien plus simple que le texte ne le ferait croire par la longueur de ses explications. Ces principes sont aussi donnés dans ce que nous avons nommé nos *Aphorismes* (1272), où nous avons renvoyé à un autre article un peu plus loin (1318), pour le principe de la hauteur des ogives.

1409. Avec les excédants des roues qui mènent jusqu'à leurs pointes, il convient de donner au limbe bien écroui, ainsi qu'aux dents, une épaisseur proportionnée à la pression qu'elles éprouvent, pour que les pointes des dents ne s'affaissent pas.

1410. En traçant un calibre, on ne doit y marquer que les diamètres primitifs, qui se touchent seulement au point de l'engrenage, sur la ligne de leurs centres; les excé-

dants ou arrondis, dont on laissera au moins exactement la matière en finissant d'ébaucher les roues et les pignons, suffiront seuls à produire la juste *pénétration* de l'engrenage.

ÉCHAPPEMENTS MODERNES PRATIQUÉS ACTUELLEMENT.

1411. Cette série des échappements modernes comprend ici celui à cylindre renouvelé en quelque sorte aujourd'hui par le grand usage que l'on en fait, quoiqu'il soit du temps de Graham son auteur. Cet échapp., mieux apprécié actuellement, et exigeant peu de hauteur, est aussi employé forcément dans les platitudes du jour; nous commençons par son explication détaillée, parce que c'est celui que le plus grand nombre des lecteurs désirent connaître. Ces détails prépareront d'ailleurs à l'intelligence et l'exécution des autres échappements qui n'auront pas alors besoin d'être expliqués si longuement.

1412. Nous ne connaissons pas d'ouvrage qui en ait traité aussi explicitement que Ferdinand Berthould, car celui de *Jodin*, bien que vrai sur ce sujet, ne nous paraît qu'une longue déclamation, où son auteur a évité de donner aucun renseignement pratique à ses contemporains. M. Wulliamy, horloger du roi, à Londres, dont nous citerons plus loin les savantes constructions pour l'échapp. à ancre, a fait vainement la recherche des mémoires que *Graham* était censé avoir pu communiquer à la Société royale anglaise, et il n'y a point trouvé d'écrits de cet habile artiste sur ces deux échapp. Il paraît que Berthoud n'a pu en connaître la construction et les proportions que d'après les Montres et Pendules anglaises de Graham qu'il se sera procurées. Si quelques observations de Berthoud sur ce sujet nous paraissent judicieusement raisonnées, d'autres se trouvent peu exactes. On a repris et modifié en partie cet échappement à diverses époques, et on l'a exécuté, le cylindre en rubis, au moyen d'une monture dite à manivelle; mais cette précaution qui contribue nécessairement à sa durée, ne change rien aux principes. Actuellement on exécute très-fréquemment et presque exclusivement le cylindre et la *roue* en *acier trempé dur*, sans qu'il se manifeste d'usure sensible pendant un assez grand laps de temps, lorsque l'exécution en a été suffisamment soignée; on en a d'ailleurs beaucoup abrégé et perfectionné le travail, au moyen d'outils spéciaux, indispensables quand on l'exécute par quantités, ce qui en réduit beaucoup le prix. La forme excessivement plate des montres, et qui ne laisse aucune solidité dans plusieurs parties, y a déterminé le choix de cet échappement, comme n'exigeant pas autant de hauteur en cage, quand le cylindre n'est pas en rubis. Les figures que nous prenons dans Berthoud supposent au contraire une cage très-haute, comme on le pratiquait de son temps et avantageusement pour le mécanisme général, en conservant les mêmes principes de construction. Alors, la roue de cylindre était toujours en laiton tiré du fond d'anciennes chaudières à suif, supposé plus épuré par le feu et adouci par la matière même qu'on y avait fondue pendant des siècles. On prenait des morceaux de ce laiton très-épais, et on les écrouissait au marteau jusqu'à l'épaisseur qui devait rester à la roue; mais l'expérience moderne a prouvé que l'on peut très-bien faire cette roue en acier trempé.

1413. L'échappement à cylindre de Graham n'est, comme l'on sait, que l'application au balancier à grandes vibrations des Montres, des principes de son premier échappement à grande ancre et à repos pour les régulateurs et les Pendules qui n'ont comparativement que des oscillations peu étendues. L'échappement à ancre a été représenté provisoirement fig. 14 de notre planche XXVI. Mais nous en donnerons une plus exacte et plus détaillée, quand nous traiterons des régulateurs à long pendule. On voit seulement par cette fig. 14 et par celles de la Pl. XL, que le cylindre des Montres se réduit en principe à une ancre qui n'embrasserait qu'une dent de sa roue, et que le rapprochement du centre du cylindre lui fait parcourir de beaucoup plus grands arcs, tant de levée que de repos, tandis que l'ancre des régulateurs n'en fait parcourir que de très-petits au pendule, et qu'en outre, les plans inclinés de l'ancre sont transportés aux dents de la roue dans les Montres. Mais nous laisserons parler Ferdinand Berthoud pour la suite de ce sujet, sauf quelques mots explicatifs, une observation finale importante, et l'abréviation de détails superflus, aujourd'hui que ce mécanisme est plus répandu.

« Les plans inclinés formant la levée de cet échappement pour les Montres sont portés, dit Berthoud, par la roue d'échappement A, fig. 1, Pl. XL, ainsi construite pour faciliter l'étendue des vibrations du balancier, qui peut parcourir trois quarts de tour. Le diamètre intérieur du cylindre B, même fig., est égal à la longueur *e d* d'une dent A, fig. 7, ou *e*, fig. 1, de sorte que le cylindre peut tourner autour de la dent.

« Le plan incliné de la dent agit alternativement sur les épaisseurs ou tranches du cylindre, *d c*, fig. 1, ou *f c*, fig. 7, qu'on nomme autrement *lèvres*, et l'oblige à tourner alternativement d'un côté et de l'autre, quand chaque levée est successivement en prise.

« La tranche ou lèvre *f* du cylindre est arrondie pour adoucir le frottement d'entrée de la dent; l'autre tranche, lèvre, ou épaisseur *d c*, a une face inclinée, comme on les voit dans la fig. 7, qui est le *plan* de la roue. La fig. courbe *c d i e f* est la *coupe* du cylindre prise par son travers et à angle droit avec son axe représenté par le point du centre A; c'est cette lèvre *d c* du cylindre que la dent écarte lorsqu'elle sort en s'éloignant du centre du cylindre. L'entaille *e* du cylindre, fig. 1 et 3, pratiquée plus profondément au-dessous de la lèvre *d*, a pour but de permettre l'étendue des arcs du cylindre qui, sans cela, toucherait vers la partie *e* de la dent, fig. 1. Le cylindre B porte en C un index ajouté momentanément, pour marquer sur une platine D divisée en degrés, les arcs que l'échappement fait parcourir; ces deux dernières pièces ne font pas partie de l'échappement et ne servent ici qu'à vérifier l'étendue des arcs de levée produits par les plans inclinés des dents sur les lèvres du cylindre, et à estimer le point du balancier où doit être placée la cheville de renversement qui borne l'excès d'étendue des vibrations. On s'en sert aussi, lorsque les inclinés des dents sont courbes, pour juger si la menée est uniforme. NOTA. *La fig. 7 est un renversement de la fig. 1.*

« La fig. 4 *bis*, à part le pointillé, est proprement le cylindre nu, avant d'être garni de ses tampons ou bouchons portant les pivots. La fig. 5 est le bouchon du haut (côté du balancier) tourné de sorte que sa partie *f* entre juste et à force dans l'intérieur du cy-

lindre *f*, fig. 4 *bis;* il porte au centre une petite tige d'acier *h* qui sert à former le pivot; *n* est la partie du tampon qui se rive au balancier. La fig. 6 est le tampon inférieur du cylindre devant être de même grosseur, entrant également dans l'autre extrémite du bas, et portant son axe d'acier pour former le pivot inférieur. La fig. 3 représente le cylindre garni de ses bouchons et pivots, et auquel il ne manque que le balancier.

« Le diamètre intérieur du cylindre étant de la longueur d'une dent finie, et avec très-peu de jeu, le diamètre extérieur a pour mesure, avec très-peu de jeu aussi, l'intervalle des dents de la roue, qui comprend celui d'une dent retranchée, plus deux fois l'épaisseur de la fraise qui a fendu la roue; c'est dire assez que l'épaisseur de la fraise est déterminée par celle du cylindre, ces deux épaisseurs étant égales. La quantité de levée de l'échappement dépend de la plus grande largeur ou saillie hors de la roue, du plan incliné des dents, et cette largeur détermine aussi la quantité dont il faut entailler le cylindre pour former ses deux lèvres.

« La position du cylindre à l'égard de la roue doit être telle que, la dent étant dans l'intérieur du cylindre, comme en A, fig. 7, la longueur du plan incliné en forme, comme ci-dessus, le diamètre intérieur, avec un très-petit jeu, qu'on ne donne qu'à la fin; c'est-à-dire que le centre A du cylindre doit diviser en deux parties égales le côté droit *d e* du plan incliné, et tomber juste sur le bord de ce plan. De cette manière : 1° la levée de l'échappement agira à très-peu près uniformément; car, fig. 7, le point de contact du plan incliné sur le cylindre, le plus favorable au mouvement, est celui *a*, fig. 7, dont la direction circulaire passe par le centre A du cylindre. Or, par la construction, le point de contact *f* du commencement de la menée agit autant (ou à très-peu près) en dedans de la ligne ou courbe *a* A, que celui *e* de la fin de la menée agit en dehors : ainsi la force se décompose sensiblement de même avant et après la ligne courbe *a* A, que j'appelle ici celle des centres, d'où suit l'uniformité; 2° il n'y aura pas de forces perdues par les chutes. (Quand même il n'y aurait pas égalité absolue, il n'en résulterait pas un défaut; témoin l'échappement libre à cercle et à détente qui n'a de levée que d'un côté, et l'échappement à virgule simple qui, pour produire ses plus grandes vibrations, doit lever plus d'un côté que de l'autre, mais l'égalité vaut mieux.)

« Remarque. Il est nécessaire, comme nous l'avons dit, que la force motrice soit ca-
« pable de mettre à chaque instant le balancier en mouvement : or, dans une Montre à
« cylindre, pendant que la roue agit sur le repos, elle ne peut pas donner de mouvement;
« il faut donc que le spiral ramène à chaque vibration le balancier, de manière que le
« cylindre étant arrêté et tenu au repos par le spiral, il présente une lèvre sur laquelle le
« bout du plan incliné de la dent *f a*, fig. 7, puisse agir pour rendre le mouvement au
« balancier. La position du cylindre et la hauteur du plan incliné déterminent combien
« le cylindre doit être entaillé : car, 1° fig. 7, si la hauteur *f e* du plan incliné est de la
« 12° partie de la circonférence du cylindre, c'est-à-dire qu'elle réponde à une étendue
« de 30° du cylindre, le plan incliné *d e* aura fait parcourir 30° au cylindre lorsque la
« roue aura avancé de *f* en *d;* et 2° si l'on suppose que le cylindre A est entaillé par son
« centre, on voit qu'immédiatement après que le plan incliné *f a* aura agi sur la tranche

« *f*, le spiral ramènera le cylindre en sens contraire au même point *f* d'où il était parti :
« ainsi, le plan incliné *d e* passerait de *e* en *g* sans avoir agi sur le cylindre; ainsi
« chaque dent n'agirait que sur une tranche : d'où l'on voit qu'on parera à cet obstacle
« en ajoutant à la demi-circonférence *d e* du cylindre la quantité *e f*, ou son égale *c h*
« égale à la hauteur des plans inclinés; chaque dent agira successivement sur les
« tranches du cylindre avec une levée de 30°, hauteur supposée du plan incliné; et le
« spiral étant en repos présentera une des tranches du cylindre pour la mettre en prise
« avec les dents de la roue : ainsi, dans la position que nous avons déterminée au cy-
« lindre, il faudra qu'il soit entaillé de la moitié de sa circonférence, moins la hauteur
« du plan incliné *e f* des dents de la roue; la fig. 7 présente aussi les différents instants
« d'action de la roue sur le cylindre. » (*Avant d'adopter ces mesures, il sera utile de lire notre observation à la fin de ces articles.*)

1414. Il faut remarquer d'abord que, pour exécuter une roue de cylindre, on doit être pourvu d'un excellent outil à fendre ou diviser, accompagné d'un appareil particulier pour entamer ce qu'on appelle les U de la roue, et pour former et arrondir les *colonnes*, espèces de petites tiges relevées de champ aux extrémités des U et qui portent les plans inclinés; leur ensemble constitue les dents du cylindre. Il faut aussi le petit appareil à aiguille et à division, déjà indiqué fig. 1, pour s'assurer de l'exactitude de l'entaille des lèvres; enfin un autre outil propre à égaliser entre eux les plans inclinés, etc. Peu d'artistes possèdent tous ces outils, il faut sacrifier des soins à les nettoyer et en renouveler les huiles quand ils sont restés quelque temps sans servir, et les mettre en état de fonctionner à coup sûr, après les avoir éprouvés sur des roues d'essai; une roue de cylindre en acier est une pièce très-délicate, surtout vu qu'elle reste trempée à blanc; l'exécution et le tamponnage du cylindre est sujet à le faire fendre, cas où il devient hors de service. Il résulte de toutes ces considérations que l'artiste peu expérimenté en ce genre doit préférer l'emploi de cet échappement tout fait par des ouvriers spéciaux. La Suisse en produit de très-bien exécutés, suivant le prix, toujours très-réduit actuellement. Les marchands de fournitures tiennent des cylindres ébauchés, et surtout des roues d'acier proprement exécutées, extrêmement délicates, trempées, finies et polies, et de toutes grandeurs. Mais il y a toujours les cylindres à finir, les roues à enarbrer et river à leur pignon; il faut *justifier* les pointes des dents, la hauteur des plans inclinés et la rondeur, etc., et outre les accidents possibles il faut bien comprendre cet échappement et en avoir déjà pratiqué la main-d'œuvre pour établir le tout à son vrai point. Il est donc plus sûr et plus économique d'envoyer aux faiseurs spéciaux la cage et les parties adjacentes, pour que cet échappement soit exécuté à moins de frais et de perte de temps par ceux qui en ont l'habitude particulière, qui en font état, dont les outils entretenus sont toujours prêts à fonctionner, etc. Cependant, en faveur du rhabillage, et de quelques cas obligés, nous allons rapporter ici ce que Berthoud recommande pour son exécution (1).

(1) Nous croyons utile d'indiquer ici des Artistes qui exécutent spécialement à Paris l'échappement à cylindre, tels que : M. *Parent*, rue de la Monnaie, n° 7, au bas du pont Neuf, dont l'habileté est reconnue, ainsi que M. *Schefer*.

1415. « Pour bien concevoir le mécanisme de cet échappement, il est à propos d'observer les formes d'une roue de cylindre, d'abord dans les figures en perspective que nous avons citées en tête de cet article, c'est-à-dire les fig. 1, 2, 3 et 4 *bis* de la planche XL, celle 2 étant la roue en profil géométral, comme aussi la fig. 9, qui en donne le plan et la division ainsi que la taille progressive de quelques dents; le dessous de cette roue est retourné ici en dessus fig. 9, telle qu'elle doit être placée et centrée sur le tasseau... de l'outil à fendre, au moyen d'un disque *c* de moindre grandeur, mais serrant le bord intérieur du limbe, avec 3 ou 4 vis, passant au travers des croisées de la roue. (V. aussi les fig. 1 et 3, pl. VII, du tome Ier.)

« Dans la fig. 8, le corps ébauché de la roue, vu par le dehors, est représenté en *a b*, profil géométral. La partie saillante *a a* est l'épaisseur débordant le cercle qui doit servir à former les plans inclinés, et *b b* est la partie qui fournit la matière des colonnes portant ces mêmes plans inclinés. La fig. 12 représente une *coupe*, supposée prise par le centre de la roue ébauchée pour en laisser voir le vide intérieur et le trou central de rivure. On y voit aussi l'épaisseur *a a* du fond, l'épaisseur *b c* qui doit fournir la matière des colonnes, et enfin la plus grande largeur *d e* des plans inclinés. Ces proportions sont ici exagérées en épaisseur, parce que Berthoud parle de roues en laiton, plus fortes en matière, comme on les exécutait de son temps, et où il y avait beaucoup à enlever dans le finissage; mais celles en acier sont beaucoup plus légères, et les épaisseurs des parties de détail sont à peine un tiers de celles des fig. 8 et 12. Lors donc que la roue doit être en acier, on l'ébauche, puis on la tourne juste aux dimensions principales requises, et, à cet égard, il est mieux de prendre ses mesures sur une roue moderne en acier des mieux faites; on y forme des croisées comme à la fig. 9, en laissant un limbe assez large pour y pratiquer les U suivant leur profondeur; on agrandit le trou du centre pour y faire entrer très-juste la petite tige *b* du tasseau, fig. 4 de l'outil à fendre. Cette petite tige doit être de dimension convenable pour que le même trou de la roue serve à la rivure de son pignon, celui dit d'échappement, sans retoucher à ce trou. On ajuste au porte-fraise une fraise ordinaire mince, qui ait pour épaisseur un dixième environ de la longueur du plan incliné; on fend la roue sur un nombre double de celui de ses dents. Il ne faut pas trop enfoncer les fentes, afin qu'il reste comme en *a*, *k*, fig. 9, un quart de la largeur du limbe pour soutenir la roue pendant qu'on la taillera; la roue prendra partout les formes aperçues aux parties 1, 2, 3, etc., de la fig. 9. On changera ensuite la fraise mince contre une de forme et d'épaisseur propre à tailler toute la longueur des plans inclinés en donnant à l'hache ordinaire de l'outil la position convenable pour l'incliné, vu en 4, 5, etc. » Il faut aussi remarquer que le plan incliné ne doit former avec la tangente du point A, fig. 7, qu'un angle du nombre de degrés ajouté au demi-cylindre, ou que la tangente étant prise en *d*, alors l'angle du plan incliné avec cette tangente ne doit être que de la moitié de l'angle voulu de levée, puisque, dans ce dernier cas, le rayon de *d* à *e* est double de celui du cylindre pris de A en *e*. Si, par exemple, on veut que la levée d'*un côté seulement* soit de 20°, comme dans la fig. 7 retournée, l'angle de *d e* avec la tangente prise

en *d* ne doit être que de 10° : (nous disons d'*un côté seulement*, parce qu'il est utile, pour s'expliquer, de ne considérer qu'une levée dans ce calcul, l'autre étant nécessairement semblable; nous avons éprouvé qu'en parlant de la levée totale des deux côtés, qui serait alors ici de 40°, des artistes traitant ce sujet arrivaient souvent à ne point s'entendre). On fera donc les plans inclinés tels qu'on les voit en 4, 5, fig. 9. En faisant le tour de la roue, on ne taillera qu'un incliné sur deux dents, puisque la dent intermédiaire doit être retranchée, afin de laisser le vide propre à recevoir le cylindre entre deux dents, raison qui a fait prendre comme ci-dessus sur la plate-forme un nombre double de celui des dents qui doivent rester à la roue : celle-ci étant supposée de dix dents, quoique la fig. n'en porte que 9, doit être en conséquence fendue sur le nombre 20 de la plate-forme, et ainsi des autres nombres. (*Il y a erreur de division à cet égard dans le texte de Berthoud.*)

« Il faut ensuite former les vides ou les U 6, 7 et *a*, etc.; on emploie alors à cet effet l'équipage spécial des roues de cylindre dont nous avons parlé (art. 1414). Cette partie de l'outil porte une hache verticale dont le porte-fraise traverse le bras inférieur où il reçoit une très-petite fraise cylindrique dont la taille fine est dans le sens de son axe, et dont les petites dents sont inclinées comme en rochet. L'équipage est garni de boîtes mobiles par vis de rappel, de vis de pression et de pièces d'arrêt, pour disposer le tout en sorte que le bas de la petite fraise cylindrique ne puisse qu'affleurer le dessous des plans inclinés (la roue renversée), et que son action bornée entame tous les U avec une profondeur égale. Enfin la petite fraise cylindrique pénétrant ainsi jusque dans le vide de la roue, ne laisse pour soutenir les plans inclinés que des supports en forme de pilastres presque carrés; mais une autre fraise à large bord, et dont l'épaisseur est juste la distance entre le fond de la roue et le dessous des plans inclinés, est susceptible, par les dispositions de l'équipage, de rouler autour du pilastre et de l'arrondir en forme de 1/2 ou 2/3 de colonne, le bord de la fraise étant assez large pour que la tige qui la porte ne touche pas à la partie la plus saillante du plan incliné; car à cette époque les fausses dents étant abattues, laissent la liberté à cette fraise de faire à peu près le tour de la dent, en laissant au milieu de son mouvement un vide qui contient la portion de colonne et détermine à volonté son diamètre. Il résulte de tous ces moyens un résultat identique sur toutes les parties essentielles de la roue et de ses dents. Berthoud donne la figure perspective fort embrouillée de cet équipage de l'outil, mais la vue de la machine et son usage en apprennent plus que toutes les descriptions; d'ailleurs plusieurs constructions diffèrent les unes des autres, et surtout les dernières plus perfectionnées aujourd'hui que celles du temps de Berthoud.

« On voit donc, par ce que nous avons cru nécessaire ici pour donner une première idée de cette opération, qu'elle est fort délicate, difficile à bien exécuter, et sujette à de fréquents accidents dans sa main d'œuvre, comme aussi dans sa trempe. Quand on connaît bien ces difficultés, on achète préférablement, chez le marchand de fournitures, des roues toutes faites, où il y a néanmoins à retoucher, à justifier, etc., et des cylindres ébauchés qu'il faut achever, tremper et faire revenir aux extrémités, et même des

cylindres trempés et polis. Le plus sûr et le plus économique en temps, comme nous l'avons dit, est de s'adresser directement aux faiseurs d'échappements.

« Après avoir enarbré la roue en la rivant sur son pignon, les pointes de ses dents étant dirigées préalablement dans le sens de sa marche, après qu'on aura frisé l'extrémité des dents pour donner à la roue sa rondeur voulue, etc., il restera à faire le cylindre ou à le finir, s'il n'est qu'ébauché, comme on a pu le faire à l'égard de la roue.

1416. « Pour faire le cylindre, on se servira du meilleur acier forgé carré d'Angleterre, car l'acier *tiré* est sujet aux gerçures et à être imperceptiblement fendu dans le sens de sa longueur, outre que l'action de la *filière au banc* corrompt la disposition naturelle de ses molécules. L'acier *forgé carré* ayant ses quatre angles abattus à la lime et étant tourné cylindriquement, doit être assez gros pour n'entrer pas tout à fait encore dans l'intervalle des dents, comme celui *n o*, fig. 9. On se réglera pour la longueur du cylindre sur la hauteur existante depuis le talon de potence jusqu'au-dessus de la petite platine, quand il y en a une (ou jusqu'au-dessus du coq, en y comprenant alors l'assiette, les tampons, les tigerons, etc.; la hauteur totale avec les pivots étant d'ailleurs réglée par les deux contre-plaques ou coquerets du haut et du bas). Ayant coupé sur le tour la longueur reconnue convenable au cylindre, on en percera le trou un peu plus petit qu'il ne doit rester, c'est-à-dire un peu plus petit que la longueur de la dent *p n;* on l'agrandira ensuite avec un bon équarrissoir peu en cheville, en l'employant également par les deux bouts du cylindre, et jusqu'à ce qu'une dent y puisse entrer; ce tube, adouci et poli en dedans et mis sur un bon arbre lisse, aura son dehors cylindrique, adouci et poli, jusqu'à ce qu'il entre avec très-peu de jeu entre deux dents, *n o* ou autres.

« Pour diviser le cylindre on le laisse fixé sur l'arbre lisse (on peut y employer le moyen décrit, art. 589, pour la divison des pignons), et l'on y marque avec une lime tranchante le point coïncident à 360°, puis celui de 180, qui divisent d'abord le cylindre par son diamètre; on y ajoute les 20° de levée, et il ne reste plus que 160° pour l'ouverture entre les lèvres. (On pourrait employer pour une division plus exacte l'outil à fendre.) ***Mais avant on consultera nos observations finales.***

« Au moyen d'une broche de laiton adaptée au cylindre comme un manche, on fera l'entaille des lèvres, et après celle plus profonde en *e* qui se trouve au-dessous de la lèvre *d*, fig. 3, ce qui réduira le cylindre, en cette partie, au quart ou un peu moins de sa circonférence, pour éviter son contact avec les branches des U de la roue, dans l'étendue ordinaire des vibrations.

« L'épaisseur de la lèvre *f* d'entrée sera arrondie comme on le voit en *f*, fig. 7. L'autre lèvre de sortie *c d* formera un petit plan incliné vers le centre A du cylindre. Les fig. 7 et 9 sont renversées en sens contraire de celles 1, 2, 3, et 4 *bis*.

« Le cylindre ayant été trempé, adouci et poli en dehors et en dedans par les procédés connus, et de manière à ne pas altérer sa rondeur, on en fera revenir bleu le fin bord seulement des deux bouts, en tenant le milieu avec une pince à long bec froide, ou autre moyen qui tienne le milieu froid. Les deux tampons en laiton vus aux fig. 5, 6 et 3, sont

garnis chacun d'une tige d'acier trempée et revenue *violet-bleu* pour en former les pivots; on déjette les pointes de ces deux tiges jusqu'à ce que le cylindre tourne rond sur le tour. Les tampons doivent affleurer intérieurement les extrémités des entailles (on les fait quelquefois en acier avec les tigerons et pivots alors de la même pièce; et s'ils entrent avec trop peu de frottement dans le cylindre, on les y colle avec la gomme laque: car s'ils entrent trop durement ils font aisément fendre le cylindre; ils ne doivent entrer qu'avec un très-léger effort, et suivant la matière). »

1417. La roue et le cylindre ayant été faits de juste grandeur, s'il y a trop de levée les centres étant trop près, on éloigne la roue; s'il n'y a pas assez de levée, on la rapproche. Dans les Montres *Lépine*, le coq porté par un *chariot mobile* contient le balancier, comme dans une cage à part, et qui peut être plus ou moins approché de la roue, et ensuite fixé par une vis de pression. Si, lorsque le spiral est à son repos, la pointe d'une dent se présente au bord de chaque lèvre et y étant tout près d'opérer le commencement de la levée, c'est qu'alors la distance des centres est juste; et d'après l'exactitude des plans inclinés, l'amplitude de la levée doit être 20° de chaque côté. Le reste tient aux opérations pratiques de la Montre à cylindre; et pour ne pas trop allonger cet article, nous supprimons d'autres détails auxquels tout Horloger est supposé en état de suppléer par la seule habitude de remonter une Montre de ce genre. Nous n'entreprenons ici que d'exposer les principales conditions des échappements actuels, pour que le lecteur les connaisse et sache les remonter à leur vrai point. Quant à l'exécution, une première ne suffit pas pour y exceller; il en faut acquérir la pratique par l'observation raisonnée des détails. Cependant, ce que nous avons dit ci-dessus suffit pour exécuter un échappement à cylindre lorsqu'on en a le goût et la patience et que l'on est maître de son temps. Les plus habiles finisseurs de Suisse ou de Genève ne perdent pas le leur à faire des échappements, ils s'adressent aux autres ouvriers spéciaux et exercés dans cette seule partie, qui la font mieux, plus vite et à meilleur marché.

1418. *Berthoud* ajoute à sa description de l'échappement à cylindre, et ailleurs, diverses observations générales sur les échappements à repos, leur balancier, etc., qui se rattachent aux articles précédents, et que nous réunissons ici dans l'intérêt du sujet; elles seront suivies de la remarque importante annoncée sur l'ouverture du cylindre.

« Dans les Montres ordinaires, dit-il, une cheville placée au balancier suffit pour en prévenir le renversement, et sans danger pour les parties délicates: il n'en est pas de même pour celles à vibrations lentes qui ont des balanciers pesants; car alors, à cause de la grande inertie du balancier, si l'on agite un peu fortement la Montre, la cheville de renversement frappera avec force contre celle d'arrêt, en sorte que la réaction s'en portera sur un des pivots et le cassera. Pour éviter un tel inconvénient, on place diamétralement sur le balancier deux chevilles de renversement qui frappent en même temps sur deux chevilles attachées au coq (cette coïncidence exacte n'est pas facile), et qui reçoivent ou amortissent toute la force du balancier. Mais si l'on a besoin que le balancier parcoure plus d'un tour (comme parfois dans l'échap. *Duplex*, dont nous allons incessamment nous

occuper), on fixe deux chevilles au coq, et deux chevilles au balancier, mais de celles-ci l'une est en dessus et l'autre est en dessous. L'une de celles du coq est assez élevée pour recevoir le choc de la cheville supérieure du balancier sans empêcher le passage de sa cheville inférieure, et l'autre du coq qui arrête la cheville inférieure du balancier, n'empêche pas non plus le passage de sa cheville supérieure; alors le balancier peut décrire plus de 360°. (Dans ce cas le battement des chevilles serait moins dangereux, parce que, lorsqu'il arrive, le balancier ayant armé beaucoup plus le spiral, a d'autant plus perdu de sa force acquise, puisque, par l'extinction naturelle de celle-ci, le balancier est près de rétrograder, et que sa force de mouvement approche d'être éteinte. L'article ci-dessus de *B*. ne paraît ni clair ni exact.)

Sur les frottements du cylindre.

1419. « Lorsqu'on cherche, dit *Berthoud*, à rendre les frottements constants (principalement dans l'échapp. à cylindre), il ne faut point perdre de vue ce principe : qu'un corps donné ne peut soutenir qu'une certaine pression sans que sa surface s'en altère, et qu'au delà les parties frottantes se détruisent, d'où le frottement augmente. Si donc l'on a un grand balancier pesant, avec des vibrations promptes et étendues, c'est-à-dire avec une grande quantité de mouvement, et que l'échappement soit à cylindre, il faudra un spiral plus fort et plus de force motrice; alors le frottement sur le cylindre sera très-considérable et il en résultera une prompte destruction, à moins que les dents de la roue ne soient fort épaisses; car si ces dents sont aiguës et minces, elles pénétreront les pores à la surface du cylindre et la déchireront, d'où résultera l'augmentation de frottement, la destruction et la variation dans la durée des vibrations. L'épaisseur de la dent ou plan incliné d'une roue de cylindre doit donc augmenter suivant la proportion de la force transmise par cette roue; et au lieu de terminer en angle aigu les pointes des plans inclinés, il faut au contraire les arrondir, afin qu'ils portent sur une plus grande surface; mais pour proportionner ainsi l'épaisseur des dents, il est à propos de calculer la force transmise à la circonférence de la roue d'échappement; en voici une méthode simple qui, à la vérité, n'est pas absolument exacte, parce que nous n'y faisons pas entrer les frottements du rouage, mais elle l'est assez pour l'application que nous en faisons ici (on aurait pu approcher davantage de cette exactitude en adoptant la méthode commune de supposer un tiers de la force motrice absorbé assez généralement, terme moyen, par les frottements d'une machine de ce genre). Nous allons exposer d'abord le calcul d'une Montre qui nous servira d'exemple.

« Dans cette pièce, la roue de fusée fait un tour en 5 heures 1/2; le ressort tire 3 gros et 1/2 appliqués à 4 pouces du centre de la fusée; la roue grande-moyenne fait à l'ordinaire un tour par heure; ses pivots ont 5/48es de ligne de diamètre (il n'est question ici sans doute que du pivot roulant dans la petite platine, car celui de sa longue tige doit avoir beaucoup plus; s'il fallait estimer le frottement des pivots il serait plus exact de supposer un moyen terme entre les deux pivots, et celui de la longue tige étant supposé de 25/48es, on adopterait 15/48es pour chacun); cette roue pèse 5 grains; la petite-moyenne

pèse 2 grains 1/4, ses pivots ont 5/48es de ligne, elle fait un tour en 7 minutes. La roue dite de champ pèse 1 grain et 1/8e, ses pivots ont 3/48es, elle fait un tour par minute, et l'un de ses pivots prolongé jusqu'au cadran porte l'aiguille des secondes; la roue d'échapp. pèse de même 1 grain et 1/8e, ses pivots ont aussi 3/48es; elle fait un tour en 15 secondes, ou 4 tours par minute, et par conséquent 240 tours par heure, ou 1,320 révolutions pour une de la fusée. Cette roue de cylindre à 15 dents; le balancier fait donc 120 vibrations par minute, et 7,200 par heure, chaque vibration étant de 1/2 seconde. Le diamètre de la roue de cylindre est de 3 lignes 1/2.

« Le balancier avec la virole, le spiral et son piton pèse 13 grains et seul 12 grains 1/2; ses pivots ont 3/48es, comme ceux de la roue d'échappement. Le diamètre du balancier est de 9 lignes 1/2; le diamètre extérieur du cylindre est de 22/48es (c'est environ le 20e du balancier; d'autres le font 1/14e du diam. du balancier, pour augmenter la compensation due au frottement des repos); l'arc de levée de l'échappement est de 45° (probablement l'arc total : chaque côté levant 22° 1/2); l'arc de vibration, compris le supplément, est de 180° lorsque la Montre marche à plat.

« Pour trouver la force que le ressort de cette Montre à secondes communique à la cir-
« conférence de la roue d'échappement, il faut réduire 3 gros 1/2, force motrice, en
« 100es de grain, et l'on a 252,00, lesquels étant divisés par 1,320, nombre de révolu-
« tions de la roue d'échappement pour une de la fusée, donneront la force communiquée
« à la roue d'échappement supposée de 4 pouces de rayon : la division faite, on trouve
« 19 + 1/11,100^{es}; mais comme la roue d'échappement n'a que 21/12es de rayon, il faut
« multiplier 19 + 1/11,100^{es} par le nombre qui exprime combien le rayon 4 pouces de
« la fusée où le poids est appliqué est plus grand que le rayon de la roue d'échappe-
« ment; ce nombre est 27 + 3/7es, qui, multiplié par 19 + 1/11,100^{es} donne 5 grains
« 24/100es; c'est-à-dire qu'abstraction faite des frottements des pivots et de l'inertie des
« roues, celle d'échappement a à sa circonférence une force de 5 grains 24/100es (et après
« le tiers retranché pour les frottements, il reste 3 grains et 1/2). Or, pour éviter la des-
« truction du cylindre, je donne 3/12es d'épaisseur aux dents de cette roue, et cette Mon-
« tre soutient bien sa marche. » (On n'oubliera pas que la roue d'échappement est en laiton, dans les articles textuels ci-dessus de *Berthoud*, où ce dernier est chiffré à sa manière.)

« Nous observerons ici, continue notre auteur, que, relativement à l'échappement à cylindre, et pour que la compensation du froid et du chaud ait lieu par les frottements, plus ceux des pivots du balancier sont réduits, et plus la force motrice doit être grande, afin d'augmenter l'étendue des vibrations, d'où il suit que dans une telle Montre la pression sur le cylindre en est plus considérable et les frottements d'autant plus grands, et ainsi des variations que ce frottement produit. Donc il serait préférable de faire de plus gros pivots au balancier; on diminuerait par ce moyen l'étendue des vibrations et le frottement sur le cylindre. (On fait tout le contraire dans la méthode actuelle, qui tend à de *grandes vibrations*, d'après l'expérience acquise qu'elles *règlent mieux*.)

« Il faut encore remarquer, par rapport aux frottements, que quoique dans deux

Montres de même espèce on ait fait les pivots de même grosseur, les roues de même poids, les ressorts de même force, enfin toutes les dimensions parfaitement les mêmes, il peut très-bien arriver que les frottements ne soient pas semblables, surtout si ces Montres sont à cylindre; car l'acier dont les cylindres sont formés peut assez différer pour produire des frottements différents; les surfaces du cylindre et des pivots peuvent être moins unies dans une Montre que dans l'autre, ce qui dépend encore de la nature de l'acier; les pivots moins durs ont aussi plus de frottement. Le laiton des trous peut être plus ou moins poreux, moins pur, etc. Ainsi, quoique l'on ait employé tout l'art imaginable à deux Montres, on ne doit pas s'attendre à les voir marcher avec la même précision. Il est vrai que les écarts uniquement produits par la variabilité des matières ne peuvent pas être fort considérables, et que l'on peut d'ailleurs les corriger en partie : mais il est bon d'envisager sous toutes les faces ce qui contribue à la régularité de ces machines.

« Enfin, indépendamment de ces causes de variation dans les Montres, il y en a encore d'autres qui, pour être moins apparentes, ne sont pas moins réelles, car ces machines sont sujettes à des écarts, lors même qu'il n'arrive pas de changement ni dans la température ni dans la position de la Montre, enfin lorsqu'il paraît que les frottements doivent être les mêmes. Ces variations peuvent être causées : 1° par les changements de pesanteur de l'atmosphère ; 2° par la différente élasticité du spiral ; car, quoique nous ne connaissions que l'action du chaud et du froid sur un ressort, il peut y avoir d'autres causes qui en changent la force ; 3° l'humidité et la sécheresse peuvent changer la nature des frottements. Je n'ai pas pu jusqu'ici faire des expériences qui m'autorisent à poser rien de certain : ce ne sont donc ici que des conjectures. Au reste, si les écarts que j'ai remarqués tiennent à une des causes que j'ai supposées, ou à plusieurs, il est évident qu'on en diminuera d'autant plus les effets, que les Montres auront une plus grande quantité de mouvement, et que les frottements en seront plus réduits et rendus plus constants.

Remarques sur la manière de rendre les frottements constants.

1420. « Puisque la régularité des Montres dépend du *rapport* des frottements avec la *force du mouvement du régulateur* (du *balancier* dans les Montres, comme du *pendule* dans les Horloges astronomiques) et de la *constance* des frottements, il faut rechercher tous les moyens qui peuvent y conduire; nous avons déjà traité deux de ces objets, nous ajouterons seulement quelques remarques sur le dernier.

« 1° Les grosseurs des pivots étant données, on rendra les frottements plus constants en exécutant ces pivots avec tous les soins connus (leurs pointes tournées sur les cônes, et les cônes sur les pointes, alternativement, et plus d'une fois les parties cylindriques finies à la pointe du burin, puis polies rapidement au rouge, etc. : on soignera aussi les trous en préférant à l'usage de l'alésoir celui du charbon doux avec une pointe ronde de fusin.) On y emploiera du laiton de chaudière bien durci; la longueur des pivots sera proportionnée à leur diamètre. La règle que je me suis faite est de donner à cette

longueur deux fois son diamètre. (Avec l'arrondi du bout, et le jet de hauteur en cage, on peut donner au moins 2 fois 1/2, et jusqu'à 3.)

« 2° Pour réduire les frottements, il est avantageux de répartir également sur les deux pivots la pression sur chaque pignon : (même observation pour les balanciers; il faut alors des cages raisonnablement élevées par leurs piliers), c'est le plus grand avantage des barettes ou ponts que l'on met sur les platines. Il est même à propos, pour parvenir au même but dans les pièces à répétition, de mettre, ainsi que je le fais, des ponts en dedans des platines, afin d'accourcir les tiges qui le nécessitent pour que le pignon se trouve également distant de ses deux pivots, que l'on peut alors tenir plus petits. (Sans raccourcir ces tiges dont la longueur est toujours avantageuse, ne pourrait-on pas tenir plus petits les pivots qui ont plus de frottement, surtout avec des trous en rubis?)

« 3° Il faut pratiquer aux trous des réservoirs profonds, sans être plus larges, et contenant assez d'huile pour qu'elle puisse se conserver et rester fluide plus longtemps. (Il faut pour cela une épaisseur suffisante aux platines, et *Berthoud* les tenait souvent trop minces, comme on le remarque dans la plupart de ses pièces.)

« 4° On met communément des calottes aux Montres à cylindre; mais, outre que souvent elles gênent le mouvement et en réduisent le volume, je les crois à peu près inutiles pour le préserver de la poussière, qui entre presque autant par la quantité d'ouvertures dont les calottes sont percées. Il faut supprimer le ressort de la boîte et la faire fermer par le seul frottement élastique de la lunette; les boîtes en sont beaucoup plus closes (on les fait toutes ainsi actuellement).

« 5° On sait que l'huile est essentielle pour adoucir le frottement des pivots et d'autres parties; mais il n'est pas indifférent de prendre telle ou telle huile; c'est de sa nature que dépendent l'uniformité et la constance des frottements. L'huile très-fluide s'évapore promptement, et la matière gluante qu'elle laisse augmente beaucoup la résistance. C'est ce qui arrive aux huiles préparées. (C'était donc du temps de l'auteur comme actuellement?) Il n'est pas aisé de choisir : car il faudrait une huile très-fluide dans nos Montres, vu le peu de force employée, et il faudrait aussi qu'elle fût longue à s'évaporer, et c'est ce qui ne se peut. Il vaut mieux, du reste, que la résistance soit plus grande et permanente. J'emploie avec succès d'excellente huile d'Aix sans préparation : la plus pure et fraîche est la meilleure. (On ménage trop souvent la force dans nos pièces d'Horlogerie. Quant à l'huile, on se contente de filtrer la meilleure au travers d'un godet mince de bois dur, de buis préférablement; la première demi-livre passée emporte le peu de goût du bois, et peut encore servir pour la table. Celle qui passe après est excellente pour l'Horlogerie, si l'huile a été faite avec un fruit bien mûr et dégagé de ses noyaux; mais c'est ce qu'il n'est pas facile d'obtenir.)

« Il faut encore observer que l'on ne doit pas employer le même corps huileux ou gras pour tous les frottements. L'on emploie les plus épais aux Horloges de clocher. Au frottement de l'essieu d'une voiture, l'huile d'olive ordinaire servirait autant que de l'eau pure. »

NOTA. Parmi ces observations de *Berthoud*, que nous avons cru devoir reproduire ici pour éviter d'y revenir, plusieurs sont raisonnablement déduites de l'expérience; mais d'autres sont peu concluantes, surtout pour les constructions actuelles. On n'établit plus de Montres portatives dont la vibration du balancier soit de 1/2 seconde, vu l'influence reconnue du porter sur un mouvement trop lent.

1421. On a dit que l'on n'emploie plus de roues de cylindre en laiton, et qu'elles sont aujourd'hui en acier trempé ainsi que le cylindre, et n'usent pas trop sensiblement quand l'échappement est bien disposé suivant les principes, et soigné dans son exécution. La roue de laiton usait aussi très-souvent; mais on n'eût pas osé dans les premiers temps la faire en acier, d'après l'usage admis généralement, et qui convient lorsqu'il est appliqué à sa place dans divers cas, de ne pas faire travailler l'un contre l'autre des métaux de même nature. Quelques-uns pensent même aujourd'hui que le contact de métaux différents peut développer une propriété galvanique d'une intensité variable, que l'on croit n'avoir pas lieu au contact de métaux semblables.

Quant aux frottements, les cylindres en rubis, au moyen d'une *monture* dite manivelle, que l'on peut employer dans des mouvements d'une hauteur (épaisseur) raisonnable, n'éprouvent plus les mêmes frottements qu'avec une roue en laiton et un cylindre d'acier, et sont d'une durée presque sans fin, si on les entretient d'huile. Enfin l'usage actuel des trous en rubis vient encore affaiblir ou modifier les observations de *Berthoud*, en réduisant beaucoup le frottement des pivots. En sorte qu'il faudrait actuellement de nouvelles expériences bien dirigées, ce qui en Horlog. n'est ni facile ni commun. *Berthoud* a traité plusieurs questions par le calcul, mais quand l'effet n'y répond pas, il est si facile de changer les proportions sans le dire, et l'on peut si aisément donner ce qu'on appelle vulgairement le *coup de pouce*, pour laisser le calcul triompher! Les bases de ces calculs sont si incertaines, si fugitives, que l'expérience, suffisamment répétée, peut seule en établir la preuve, ou celle d'un raisonnement séduisant. Nous n'avons rapporté ceux de *Berthoud* que comme un exemple de l'exigence du sujet, comme réflexions et remarques qui peuvent avoir dans certains cas leur utilité, moins grande toutefois que celle de bonnes expériences, qui sont la vraie *pierre de touche*, ce que l'on oublie trop souvent.

1422. Une autre modification pratiquée à l'échappement à cylindre et reprise en divers temps est le changement de la ligne droite du plan incliné de la dent, à laquelle on a substitué une ligne courbe dans l'intention d'établir une proportion uniforme entre la progression de la roue, pendant la levée, et les arcs qu'elle fait alors parcourir au balancier pendant la courte durée de cette levée. *Alex. Cumming*, Horloger anglais, membre de la Société philosophique d'*Édimbourg*, paraît être le premier qui en ait émis l'idée vers 1776. Il adopte, pour cette courbe, une portion de circonférence d'un rayon moitié de celui de la roue; la fig. 10 de la planche XL explique son idée. Il admet le degré actuel d'ouverture du cylindre, indiquée en *a*, *b*, *c*. La levée courbe de sa dent en *o*, dont le centre est en *d* ou *e* fut adoptée d'abord en Suisse, abandonnée ensuite, puis reprise dans ces dernières années assez généralement. C'est encore pour quelques

artistes un sujet de doutes et de discussions, et les avis sont partagés. Les partisans de la forme première de la dent de *Graham*, rapportée par *Berthoud*, pensent qu'il est peu important de régulariser ainsi l'effet de diverses portions de la levée dans une action aussi instantanée, comparativement à de si grands arcs de supplément, et que cette mesure recherchée des forces à chaque instant de la menée doit être fortement troublée et incertaine, par le mélange de la force du balancier déjà en mouvement et de la résistance du spiral qui recommence à s'armer pendant cette levée; que le plus sûr en cette affaire serait d'expérimenter quelle forme d'incliné produit le plus de vibration supplémentaire au balancier, qui se trouve ordinairement mieux réglé par les plus grands arcs. La ligne droite des plans inclinés paraît être l'intention de *Graham*. Cette expérience n'étant pas faite ou connue authentiquement, on peut dire : *Adhuc sub judice lis est :* la question reste à juger.

1423. *Berthoud*, à qui l'Horlogerie postérieure à son temps doit certainement beaucoup, avait commencé par étudier et soigner l'échappement à roue de rencontre des Montres, auquel se bornaient d'abord ses études en ce genre, et rejetait tous les échappements à repos, tant en Montres qu'en Pendules, comme nous l'avons observé ailleurs; aussi dit-il au sujet de ceux-ci, page 93 de son *Essai :* « L'appui de la dent sur le « repos retarde considérablement la vibration du pendule : car dans le pendule à « demi-secondes (qu'il cite) on trouve que sa longueur n'est que de 9 pouces depuis « le centre de suspension jusqu'à celui de la lentille, et cependant la machine est ré- « glée au temps moyen; au lieu que si le pendule était libre, le centre de la lentille « (pour la même marche) serait au moins trois lignes plus bas. On voit par là com- « bien la pression sur le repos dérange les oscillations, à plus forte raison dans les « Montres à cylindre, où la force motrice doit être en état de donner le mouvement « au balancier, etc. »

Le même auteur répète ailleurs la même opinion, page 100, et ajoute : « Si l'échap- « pement à repos est *le plus mauvais* qui soit applicable aux Horloges à ressort, *ce n'est* « *assurément pas le meilleur* que l'on puisse adapter aux Montres; car, comme nous le « ferons voir, s'il arrive que des Montres avec cet échappement aillent bien, ce n'est « pas qu'il soit meilleur, mais c'est que d'autres défauts corrigent ceux qu'il a : nous « nous expliquerons là-dessus, etc. »

1424. Comment concilier maintenant ces décisions positives et répétées qui ont fait éclore l'ouvrage de *Jodin*, combattant avantageusement *Berthoud* sur ce sujet, avec la pratique de ce dernier d'employer l'échappement à cylindre dans ses meilleurs travaux, dans ses Montres les plus soignées et du plus haut prix... et même avec le choix qu'il a fait du cylindre pour l'échappement de son Horloge marine n° 8, l'une de celles qui lui ont le mieux réussi et qu'il préfère dans son Traité des Horloges marines... lorsque ses régulateurs astronomiques avaient tous pour échappement la grande ancre *à repos* de *Graham?*... Ces contradictions de *Berthoud* sont loin d'être les seules dans ses sept à huit volumes.

1425. Nous avons cité plus haut, par occasion, le *cylindre fait en rubis* et sa monture dite *manivelle* (art. 412 et 421), et quoique l'usage défectueux et si répandu des *platitudes* du commerce ait fait abandonner cette construction si bien garantie de l'usure, pour celle des cylindres en acier avec roue d'acier, où ces deux pièces du moins se conservent souvent plus longtemps que le reste, nous essayerons de donner ici une première idée de ce qu'on appelle *monture à rubis*, pour la satisfaction de ceux qui préfèrent le solide à l'incertain.

La partie principale de l'échappement se compose alors d'un demi-cylindre creux, coupé dans un rubis, et avec l'ouverture requise, mais n'ayant en hauteur qu'un peu plus du double de la partie d'acier sur laquelle frottent les dents de la roue aux repos et aux levées, la forme et les proportions de cette portion de rubis lui ont fait donner dans les ateliers le nom de *tuile*, vu sa ressemblance approchée avec celle qu'on nomme *faîtière* dans l'art du couvreur. Cette tuile en rubis est maintenue dans une *monture* d'acier trempé et revenu bleu, afin de pouvoir être limé, comme les pièces de cadrature, et la monture doit être découpée habilement en forme de manivelle, courbe en un sens, c'est-à-dire circulant cylindriquement sur son plan, pointillé en E F, fig. 1, et indiquée en élévation pointillée en *b a d c e*, fig. 4 *bis*.

Vers le milieu de la monture, comme en *c d*, est pratiquée une rainure circulaire, saillante à l'égard de l'intérieur du haut, et propre à contenir le bord inférieur de la tuile en rubis, en *c d*. Quant à l'extrémité supérieure de la tuile, de *b* en *a*, elle est maintenue de même par le tampon du haut. Celui-ci est du diamètre de la tuile, et descend en *f*; il porte dans le haut son tigeron et son pivot supérieur, au delà de sa portée où se rive le balancier; le bas de ce tampon est entaillé en partie d'une feuillure circulaire et extérieure, qui reçoit ainsi l'épaisseur du haut de la tuile, de même que le fait la rainure de *c* en *d* du milieu de la monture. Le tout est en outre consolidé au moyen de la gomme laque, que l'on y introduit avec une chaleur suffisante pour la fondre, mais qui ne puisse augmenter le revenu bleu de l'acier.

La partie de manivelle descendant de *a* en *d* doit être suffisamment en arrière de la lèvre sortante du rubis, correspondant à *c d*, fig. 1, de manière que la dent qui échappe ne puisse toucher en aucun cas au montant *a d* de la manivelle, ainsi qu'il est indiqué par le plan de cette monture pointillé en E et F, fig. 1, où l'on voit que la lèvre rentrante de *f*, en A même fig., ne dépasse les bords de la manivelle que de sa partie arrondie d'entrée, la dent de roue ne pouvant toucher de ce côté à la manivelle entaillée de tout le repos extérieur que forme le rubis.

On conçoit, par la fig. 4 *bis*, que la partie de manivelle *a d*, parvenue en *d*, retourne à angle droit vers *c*, d'où elle descend verticalement et se réunit de même pièce avec la partie du cylindre qui reçoit le tampon inférieur. A partir du haut de la rainure *c d*, le diamètre intérieur, et alors réduit de la monture, est continué jusqu'au bas où il reçoit le tampon inférieur, et ce diamètre est nécessairement moindre, de toute l'épaisseur de la rainure, que celui du haut de la monture qui doit laisser passer la tuile. Le tampon du bas peut être formé de même pièce avec la monture, sauf à y pratiquer au centre le trou du tigeron sur lequel doit être pris le pivot inférieur.

La rainure *c d*, où repose le bas du rubis, se fait avec un foret en couronne, espèce de *trépan* du diamètre et épaisseur justes de la tuile. Du reste, on conçoit qu'il s'agit uniquement ici de disposer solidement le rubis de manière à remplacer dans ses fonctions la partie du cylindre d'acier sur laquelle agit la roue, en conservant les rapports et les dimensions nécessaires à l'action connue de celle-ci, qui ne doit avoir de contact avec aucune partie de la manivelle. Ces conditions et les moyens que nous venons d'indiquer doivent suffire pour déterminer les formes et les précautions à prendre. On sera encore mieux dirigé en ayant sous les yeux une monture toute faite qui puisse servir de modèle, et il convient pour la première fois d'exécuter d'abord une monture d'*essai*, afin de prévoir les difficultés de l'exécution et de les éviter dans une construction définitive, comme on le fait pour toute exécution première d'une pièce délicate et exigeant une extrême précision. On voit, du reste, qu'il s'agit ici d'une sorte d'enveloppe d'acier découpée à jour, qui puisse contenir en rubis la partie du cylindre employée aux effets de l'échappement, sans que la roue, qui *est presque toujours en acier*, ait son action gênée par la monture en question, et que cette enveloppe, d'ailleurs, reçoit ses tampons proportionnés à son diamètre intérieur nécessairement plus fort dans le haut que celui du cylindre tout en acier.

Observation finale sur la proportion moderne du cylindre.

1426. Après avoir rapporté plus haut, page 341 (fin de l'art. 1413), la proportion d'ouverture que *Berthoud* donne à son cylindre, nous avons averti plus d'une fois de la différence entre cette proportion et celle que l'on pratique aujourd'hui, et nous avons recommandé de consulter, à ce sujet, notre *observation finale* que voici :

Berthoud ajoute à la demi-circonférence du cylindre toute la quantité de levée d'un plan incliné de la roue, c'est-à-dire 20° comptés du centre du cylindre; en sorte que, cette demi-circonférence étant géométriquement de 180°, la partie pleine des repos se trouve être au total de 200°, ce qui ajoute encore au frottement de ces repos, que *Berthoud* avait tant désapprouvés, malgré la compensation évidente qui peut en résulter, suivant la mesure éprouvée de ce frottement; cette compensation est, comme on le sait, un fait établi par l'usage si commun aujourd'hui du barillet denté.

Actuellement, dans la pratique la plus générale, comme dans la figure de *Cumming*, on ne donne à la partie pleine ou repos du cylindre, y compris l'arrondi de la lèvre *f* d'entrée et l'incliné de celle *c d* de sortie, qu'environ 190° au plus; en sorte qu'au moment où l'angle postérieur de la dent échappe du bord de la lèvre *f* qu'elle a fait reculer en *e*, la pointe *d* de cette même dent tombe sur le repos en arrière du bord de la lèvre de sortie *d c*, mais seulement de la quantité nécessaire à la sûreté du repos, c'est-à-dire pour ne pas atteindre le plan incliné de la lèvre, quantité qui se trouve être d'environ 3°. V. les fig. pl. XL.

Nous disons *environ*, parce que, si près de leur centre, ces degrés ne peuvent être éva-

lués exactement qu'au moyen de l'appareil du cadran D et de son index C que souvent l'on n'a pas sous la main.

Si l'on ajoute à cette sûreté de 3° la petite partie de levée produite par l'incliné de la lèvre de sortie *c d*, ou par l'arrondi de la lèvre d'entrée *f*, qui est d'environ 5°, on aura 8° à ajouter au demi-cylindre, en plus de sa demi-circonférence, ce qui donnera 188° de plein à laisser en définitive au cylindre, indépendamment de l'entaille inférieure *e* plus considérable et dont le but est d'éviter le contact des U ; c'est parce qu'il n'est pas facile de préciser de si petites quantités, que nous avons porté ci-dessus la partie pleine du repos du cylindre jusqu'à 190° : sauf à la réduire un peu au besoin, et d'après l'expérience.

On conçoit que la chute de la pointe de la dent sur le dehors du cylindre doit avoir lieu avec la même sûreté qu'en dedans, c'est-à-dire d'environ 3° en arrière de l'arrondi de la lèvre d'entrée; cet arrondi doit s'étendre un peu plus en dehors qu'en dedans, et être formé d'une courbe moins rapide du côté du repos, où elle prépare l'entrée de la dent. La dimension des figures, quoique grande, ne permet guère d'y exprimer ces détails, dont il suffit d'être prévenu (1).

Il convient de faire les essais avec le balancier placé et le spiral arrêté par son piton, afin de tenir compte des résistances, comme aussi de l'ébat des pivots dans leurs trous garnis d'huile, et, en supposant toujours le milieu du bord d'un *plan droit* adapté à la levée de la roue, correspondre juste au centre du cylindre, comme il a été dit précédemment, car le milieu d'une levée *courbe* dépasse toujours un peu ce point de centre. Nous avons déjà dit que les levées des dents de *Graham* étaient rectilignes.

Quant au choix de la forme du plan incliné, soit droite, soit courbe, et à leur effet compliqué de la puissance du spiral et de la vitesse du balancier, comme nous l'avons dit (1422), le plus sûr serait d'expérimenter laquelle de ces formes produit le plus d'oscillation supplémentaire; car, dans ce genre de questions, le raisonnement peut aisément séduire, et il est plus certain d'éprouver le fait. Il en est de même de la différente étendue des arcs de repos pour déterminer la compensation du frottement, en supposant l'état de l'huile constant (l'épaississement de celle-ci est peu sensible dans les premiers temps, et l'on peut facilement la renouveler); mais les artistes se déterminent difficilement à éprouver diverses méthodes de construction; ils préfèrent exécuter celle que l'opinion leur fait adopter à première vue, plutôt que d'essayer des expériences multipliées plus décisives, qui exigent du temps et de la dépense, joints à une capacité peu commune en tout genre d'épreuve.

1427. C'est surtout dans les compositions mécaniques de petite dimension, où le point de départ est si incertain, que l'analyse des effets peut être remplacée avec plus de certitude par des expériences soit partielles soit générales. Mais ces expériences exigent aussi des procédés scrupuleusement isolés de toute autre influence.

(1) Le but de la fig. 11 paraît avoir été, dans *Berthoud*, d'exprimer le rapport du diam. intérieur du cyl. avec l'extérieur, et d'environ 13 à 15; mais il ne s'en explique pas. Trop grande ici pour les autres figures, celle-ci devient inutile.

1428. Nous croyons utile de citer à cette occasion un article qui s'applique à tous les cas, celui du savant auteur qui a traité dans son immortel ouvrage la partie des arts si habilement, qu'il semblait les avoir pratiqués tous avec succès. Nous invitons donc les expérimentateurs à méditer le passage suivant :

« Observer les phénomènes, dit notre auteur, les décrire et les enregistrer exactement, « voilà le travail préliminaire; plus on y sacrifiera de temps, plus on s'approchera de la « vraie solution du problème que l'on s'est proposé. C'est par ce moyen seul que l'inter- « valle qui sépare les phénomènes se remplira successivement par des phénomènes inter- « calés; qu'il en naîtra une chaîne continue, qu'ils s'expliqueront en se touchant, et que « la plupart de ceux qui nous présentent des aspects si divers s'identifieront...

« Il faut donc recueillir sans cesse les observations. Une bonne observation vaut mieux « que cent théories... Il ne s'agit pas de ce qui se passe dans l'imagination, mais de ce « qui se passe dans la nature : c'est à elle de s'expliquer; il faut l'interroger, et non « répondre pour elle. Suppléer à son silence par analogie, par conjecture, ce sera rêver « ingénieusement, habilement, si l'on veut, mais ce sera *rêver*. Pour une fois que « l'homme de génie rencontrera juste, cent fois il se trompera et délayera une ligne « vraie dans des volumes de mensonges séduisants; *combien de ces étiologies* (1) *si cer- « taines* (en apparence), *si admirées, si généralement adoptées*, ont été réduites à de « spécieuses erreurs! Combien d'autres subiront le même sort! et ce n'est point ici allé- « ger l'étude, car rien de plus difficile que de bien observer, que de bien faire une expé- « rience, que de ne tirer de l'expérience ou de l'observation que des conséquences rigou- « reuses; que de se garantir de la séduction systématique, du préjugé et de la précipi- « tation... *Diderot* (2). »

1429. Un artiste plein d'esprit, ayant cultivé dans sa jeunesse l'Horlogerie, qui était la profession de son père, mais ensuite plus connu dans la littérature par sa brillante carrière théâtrale et comme ingénieux auteur de pièces restées aux répertoires, *Caron-*

(1) Du grec αἰτία, *cause*, λόγος, discours.

(2) On dit que *Newton*, à qui l'on demandait comment il avait découvert l'*attraction*, répondit : « C'est en y pensant toujours; » mais on sait aussi combien ce puissant génie était instruit. Souvent il arrive, au contraire, qu'en cherchant à s'expliquer les causes d'un phénomène, un esprit ignorant s'abandonne et s'attache obstinément à des conjectures qu'il croit probables, mais dont l'influence soupçonnée vaguement, ou faussement estimée, nécessiterait de bonnes expériences pour en déterminer au juste la valeur. On pourrait en citer de fréquents exemples. Lorsqu'on a plus de *savoir-faire* que de véritable science, on néglige hardiment les principes avoués d'un art que l'on ignore; mais d'habiles ouvriers y suppléent, et peuvent aider puissamment au succès de productions suffisantes au moyen desquelles on exploite l'opinion; tandis que l'on serait justement taxé de n'être pas véritablement un bon horloger, si l'ignorance et les moyens de captation étaient mieux connus des admirateurs trop peu instruits sur ce sujet. C'est le cas du joueur ignorant le calcul des probabilités, et qui se trouve entraîné et égaré, dans ses conjectures, par la crainte ou l'espérance. C'est le cas aussi de bon nombre de compositeurs d'échappements, ou d'autres productions modernes. Ce qu'on appelle trop facilement *Génie*, lorsqu'il est dépourvu d'instruction, dégénère souvent en démence. On pourrait appliquer ici l'idée d'un *bon* ou d'un *mauvais* génie. Quelques esprits peu réfléchis et portés au paradoxe, frappés de rencontrer des compositions neuves qui leur paraissent originales, quoique fausses en principe, s'extasient et disent : Voilà le *génie*!... Oui, pourrait-on leur répondre, mais ce n'est pas le *bon*!...

Beaumarchais, fils de *Caron*, horloger à Paris, entreprit, vers 1753 à 54, de remplacer l'échappement à cylindre, que nous venons de décrire, par une construction nouvelle dite échappement *à double virgule*. La priorité de cette invention lui fut disputée par *Lepaute*, auteur connu d'un traité sur ces matières, estimé à cette époque. Nous laisserons de côté leurs discussions sur une invention que ces deux hommes capables peuvent très-bien avoir conçue au même temps et sans communication, et nous expliquerons plus loin cette invention ainsi que celle de l'échappement à simple virgule attribuée à *Lépine*, destinées l'une et l'autre pour la Montre. Mais, avant de traiter ce sujet, nous devons exposer ici l'échappement à ancre et à repos de *Graham* pour les régulateurs, que nous n'avons cité jusqu'ici que provisoirement. Le motif de cette transition est l'influence de l'idée de l'ancre et du cylindre de l'auteur anglais sur les deux échappements que nous venons de nommer; ils seront mieux appréciés quand on connaîtra en détail les principes de l'échappement à encre en pendule, d'une date antérieure à celle du cylindre qui dérive évidemment de l'ancre. Telle est la fécondité d'une idée juste et heureuse qu'elle en engendre souvent un grand nombre d'utiles. L'échappement simple et presque parfait de *Graham* pour la Pendule, lui suggéra celui à cylindre pour la Montre, établi sur le même principe, ainsi que, à d'autres auteurs, l'ancre libre et à repos des Montres et des Pendules, etc. Ensuite le rapprochement des deux bras ou levées de l'ancre fit naître l'échappement à chevilles, très-bon dans son genre pour la Pendule, d'où dérivent aussi les échappements à virgule. En étudiant donc les deux premiers, on aura déjà le principe de plusieurs autres. Nous traiterons aussi à la suite de l'échappement à chevilles, vu ses rapports avec l'ancre à repos, ainsi qu'avec quelques échappements de Montre.

1430. Les proportions de l'ancre et du cylindre ne sont connues que par l'imitation qui s'en est propagée dans les premiers temps, puisque, comme nous l'avons déjà dit ailleurs, on n'a trouvé sur ce sujet aucune note de l'inventeur. Nous empruntons donc ici les mesures données par deux artistes connus, qui sont *Ferdinand Berthoud*, et plus récemment M. *Wulliamy*, horloger du roi, à *Londres*, dont nous indiquerons les modifications à l'art. Régulateur.

ÉCHAPPEMENT A ANCRE ET A REPOS DE GRAHAM.

Pour les Horloges astronomiques et les Pendules à l'usage civil.

1431. La fig. 1, pl. XLI, représente l'ancre de *Graham* et une partie de sa roue. Cette composition simple est trop connue pour exiger une explication très-détaillée. On y voit aisément que quand une dent *r* de la roue A vient d'effectuer son repos en *r n*, le retour du pendule vers la verticale la met à portée d'agir sur la levée ou plan incliné *r t* du même bras de l'ancre, et qu'au moment où cette dent échappe de sa levée, la dent *e* du côté opposé tombe sur le bord du repos du bras *k a*, d'où elle agit ensuite de même sur le plan incliné de sa levée *a c*, lors du retour suivant du balancier à la verticale; après

quoi une autre dent vers *p* ayant atteint le repos *r n* recommence la même action de la dent *r* précédente, et ainsi de suite. Ces effets alternatifs seront aisément compris par ceux de nos lecteurs qui ont déjà observé ce que nous avons dit antérieurement des échappements anciens et modernes.

1432. Le diamètre de la roue d'ancre étant fixé, ainsi que l'étendue des arcs que l'on veut faire décrire au pendule, on trouvera à cet égard le centre de l'ancre ainsi qu'il suit : en supposant l'axe de la roue d'échappement chargé à l'ordinaire de porter l'aiguille des secondes, cette roue doit avoir les 30 dents dont chacune répond à deux oscillations, afin que l'aiguille dans un tour batte 60 secondes qui composent la minute. Il faut donc donner à cette roue un diamètre qui permette d'y pratiquer 30 dents assez solides, assez écartées, et ayant leurs vides assez enfoncés pour permettre aux bras de l'ancre de pénétrer librement entre ces vides sans accotement avec le revers des dents, dont la face *r v* ou *c y* n'appuie que de son bord *r* ou *c* sur les repos, vu l'inclinaison de 5 à 6° du devant de ces dents. Ici les bras sont ouverts de manière à atteindre 13 dents; ils peuvent aussi en embrasser moins. *La roue vue ici* par *l'arrière du mouvement marche à gauche, pour que son aiguille marche à droite sur le cadran.*

On commencera donc par tracer la roue A, c'est-à-dire le cercle extérieur de la pointe de ces dents. On tirera du centre de la roue à la pointe de la dent la plus élevée, celle A, par exemple, une ligne verticale *x* A prolongée en *w*, de plus du double ; c'est sur cette ligne, dite *des centres*, que sera cherché le centre de l'ancre, et où aboutira aussi la pointe de la dent A. C'est aussi à partir de cette pointe A que commencera la division des autres dents. On comptera six dents de chaque côté, non comprise celle A, et l'on subdivisera de chaque côté l'espace entre la cinquième et la sixième dent en deux parties égales. On marquera exactement le point milieu *t* ou *a* de cet espace, et la moitié qui touche à la sixième dent sera encore divisée en deux autres parties pour y faire passer du centre *x* de la roue deux rayons *xu* et *xu'* tous deux inclinés vers la ligne des centres, et qui couperont le cercle de la roue en *u* et *u'*. Sur chaque point d'intersection *u* et *u'* on élèvera une perpendiculaire au rayon, qui deviendra la *tangente* de la roue en ce point. Ces deux tangentes convergeront entre elles et prendront leur intersection sur la ligne des centres, en *w*. Ce point commun d'intersection sera donc le centre de mouvement de l'ancre, et fixera sa distance d'avec le centre de la roue; cette distance est ici de deux rayons de la roue, plus 2/3 d'un rayon. *Les traits* u w *et* u'w, *tracés doubles, peuvent très-bien être simples.*

Alors, du centre *w* de l'ancre on tracera deux segments de cercle dont l'un *c* 2 *r* passera par les pointes de deux sixièmes dents *r* et *c* : l'autre supérieur *a* 1 *t* passera en *a*, milieu de l'intervalle entre deux dents *e c*, et par le point *t*, par conséquent, l'un un peu au-dessus et l'autre autant au-dessous des points *u* et *u'*. L'espace entre ces deux segments sera la hauteur ou largeur des bras de l'ancre, c'est-à-dire la moitié de la distance entre deux pointes de dents, sauf la minime partie qui en sera retranchée en finissant l'échappement pour produire une très-petite chute de sûreté.

1433. Maintenant, si l'on veut que chaque demi-oscillation soit d'un degré et 1/2, comme

dans la figure, on tirera du centre de l'ancre, *en dehors* du rayon *wh*, un second rayon *w a q* à la distance du premier d'un degré et 1/2 ; et de même, mais *en dedans* du rayon *w o*, on tirera *w p*, lesquels, par leur intersection sur les segments de la largeur des bras, donneront l'inclinaison des levée de l'ancre. Ainsi, du point *r* au point *t* sur le bras *t n*, *r t* sera la coupe de sa levée, comme *a c* sera la coupe de la levée du bras *k c*. Alors le pendule décrira un arc total de 3 degrés pour faire fonctionner l'échappement ; on tâtera la force motrice pour avoir en plus de très-petits arcs de supplément, comme d'un quart de degré de chaque côté, afin de prévenir l'affaiblissement accidentel de la force motrice en cas d'ébranlement du mur, ainsi que l'épaississement de l'huile aux pivots du rouage, et le pendule pourra décrire en tout 3 degrés et 1/2 d'oscillation totale. (V. plus loin les art. Pendule, Régulateur.)

1434. On donnait jadis aux régulateurs de ce genre beaucoup moins d'arc de levée avec des lentilles très-pesantes ; on se borna même à 1/2 degré, ou moins encore, ce qui exposait les pièces à s'arrêter par l'effet du moindre ébranlement ordinaire auquel sont sujets tous les édifices, et l'expérience a ramené à la proportion actuelle de 3 à 4 degrés d'arc total, y compris le supplément. Nous reviendrons sur ce sujet à l'article des Régulateurs astronomiques.

L'échappement à ancre exige une extrême précision. Il y faut très-peu de chute (1). Pour peu que la distance des centres change par l'usure des trous des pivots de l'échappement, celui-ci est très-sujet à *accrocher*. Pour y obvier, on garnit en rubis les quatre trous de l'échappement, ainsi que les repos et levées de l'ancre à leurs points de frottement. Alors on a un instrument presque parfait, si le rouage, la force motrice, la compensation, etc., sont traités convenablement.

1435. On pourrait remarquer que, dans la construction ci-dessus, les repos ont lieu d'un côté au-dessus du rayon de la tangente en *x u* ou *u'*, et de l'autre côté au-dessous de

(1) Les amateurs d'astronomie désirent entendre distinctement le coup de la seconde, ce qui ne peut avoir lieu sans beaucoup de chute, ou que par des moyens qui nuisent également à la régularité de la pendule astr.; aussi les artistes habiles et expérimentés sont-ils d'une opinion directement contraire. Quand on veut obtenir la plus grande précision, il faut se conformer aux principes et aux lois du genre d'instruments dont on a besoin. Il existe de forts chronomètres de poche qui divisent la seconde en cinq coups, aisés à compter à l'oreille pendant l'observation; il suffit de prendre note préalablement de la différence entre le Chronomètre et l'Horloge astronomique, et d'en tenir compte à la fin du calcul et de l'observation. On écrit au crayon la seconde et sa fraction comptées au moment du contact de l'astre avec chacun des 5, ou des 3 fils du réticule de la lunette. Mais comme on a peu de temps pour noter chaque fil, et reprendre le compte de l'aiguille au moyen du microscope avant de reposer le Chronomètre à l'oreille, plusieurs amateurs cherchent à se procurer des instruments appelés *compteurs*; il y en a de diverses espèces, mais ils ne sont absolument exacts que quand ils sont entièrement exécutés sur les principes des chronomètres, et alors ils sont presque au même prix, moins portatifs, et moins propres à tout genre d'observations. Il vaut donc mieux se munir d'un bon chronomètre de poche; l'habitude de compter ainsi à l'oreille en observant, et de noter rapidement la seconde et sa fraction, s'acquiert facilement et procure beaucoup plus d'exactitude; comme nous avons fréquemment employé avec succès ce moyen, et que nous ne sommes pas le seul, à beaucoup près, qui l'ait pratiqué, nous pouvons citer avec confiance à ce sujet l'adage connu : *Experto crede Roberto.*

ce rayon, de la quantité d'une demi-largeur des bras de l'ancre ; mais cette inégalité, inévitable ici et d'un effet insensible en résultat, est toujours la même ; la pièce se règle naturellement en conséquence. L'inégalité des leviers de repos est comme celle des levées, dont une est sortante et l'autre rentrante, ce qui produit une légère différence d'action entre les deux demi-oscillations et se répète à toutes les secondes ; l'on verra plus loin le succès des meilleurs échappements libres qui n'ont pourtant de levée et de repos que d'un seul côté : alors l'inégalité peut être dite *infinie*, et sous ce rapport les pièces n'en marchent pas moins bien. C'est ce qu'on trouvera confirmé par la suite.

DE L'ÉCHAPPEMENT A REPOS ET A CHEVILLES

Pour les régulateurs à secondes et à demi-secondes.

1436. Le rapprochement essayé des deux bras de l'ancre de *Graham* sur un seul côté de la roue d'échappement paraît avoir donné lieu à cette construction ; l'idée en était fort naturelle, et *Lepaute*, auteur du Perfectionnement de l'échappement à chevilles, en convient lui-même. La première pensée paraît appartenir à un horloger nommé *Amant*, mais elle ne présente pas de principes géométriques comme celle de *Lepaute*, qui en a au moins perfectionné beaucoup l'application. La fig. 2, pl. XLI, représente cet échappement et une partie de sa roue ; celle-ci porte 30 chevilles sur chaque face, total 60 ; et pour éviter la chute de la moitié supérieure des chevilles, elles sont entaillées à moitié, ce qui est essentiel quand elles sont un peu grosses. On voit assez, par la figure de cet échappement, que, quand une cheville quitte son repos pour tendre à écarter de la verticale l'un des bras A, et qu'elle a parcouru sa levée, la cheville suivante de l'autre face de la roue tombe sur le repos de l'autre bras *b* (lequel ici est en arrière de la roue), pour effectuer ensuite sa levée d'impulsion sur ce bras, en tendant à l'écarter de l'autre côté de la verticale ou ligne de repos du pendule, et ainsi de suite pour les autres chevilles qui remplacent ici les dents de la roue de *Graham*. Du reste, la figure de la planche s'explique d'elle-même et plus facilement encore que la précédente de l'ancre. *Pour les* 1/2 *secondes, la même roue a le double de dents.*

1437. Un des grands avantages de cet échappement est que l'agrandissement des trous de ses pivots ne peut le faire *accrocher*, attendu que son action, prise un peu plus haut ou plus bas que la tangente, n'occasionne pas d'altération sensible. On peut donc hardiment se dispenser alors de l'emploi des rubis. Cependant, quand il s'agit de grande précision, l'avantage des rubis aux trous et aux levées n'est pas à négliger comme réduction des frottements.

1438. On doit arrondir quelque peu les repos sur leur épaisseur, pour que la cheville n'appuie qu'au milieu, et non sur les bords, afin de chasser les impuretés de l'huile et en attirer sur la ligne de contact la partie la plus fluide, par un effet physique du *capillarité*. Quand la cheville appuie à plat sur l'épaisseur des repos, ceux-ci se marquent très-fréquemment.

L'échappement à chevilles est évidemment d'une exécution plus facile que celui

à ancre, et d'un bon usage. Il n'a contre lui que l'inconvénient de permettre trop aisément à l'huile des chevilles de s'extravaser sur le limbe de la roue, qui l'attire plus fortement. Mais si l'on a soin de tenir les chevilles assez longues, sans trop les affaiblir, de les faire un peu plus grosses du bout isolé, c'est-à-dire sensiblement *en cheville* ou un peu coniques; si on y place l'huile peu à peu pour éviter le trop, celle-ci peut rester aux chevilles sans gagner la roue, qui, préalablement, doit être parfaitement dégraissée. Il faut peu de force motrice pour entretenir cet échappement; dans les pièces à ressort moteur, celui-ci doit être doux et liant. Il faut néanmoins y employer une force suffisante pour ne pas trop subir l'influence de l'huile sur les pivots du rouage, défaut où l'on tombe souvent dans l'intention de diminuer les frottements. Il y a un terme moyen à tout, et les excès en tout genre sont défectueux.

On a vu des régulateurs pourvus de l'échappement à chevilles marcher d'une manière très-satisfaisante sans nettoyage pendant plusieurs années. On peut aussi ne placer les chevilles que sur un seul côté, en tenant les deux bras l'un au-dessus de l'autre et du même côté de la roue.

On doit remarquer, dans la figure, que les chevilles du devant et celles de l'arrière ne sont pas sur le même cercle, afin que l'angle qui agit sur les levées se trouve sur un troisième cercle intermédiaire et commun. Quant à la hauteur des bras, ils sont trop longs dans la figure de Lepaute. Ils sont réduits ici à la longueur d'un rayon de la roue et peuvent être encore plus courts. Il convient de tenir la ligne de leur centre de mouvement *a c* dans la verticale, pour que l'huile ne tende pas à quitter les points de frottement. (Voy. les art. Pendule, Régulateur.)

DE L'ÉCHAPPEMEMT A REPOS, DIT DUPLEX, POUR MONTRES ET PIÈCES DE VOYAGE.

1439. L'échappement *Duplex*, attribué à *Leroy*, est celui qui a le plus de rapports avec l'achappement à cylindre de *Graham*; celui de *Leroy* est représenté en plan avec sa roue dans la fig. 3, et celle 4 en donne l'élévation géométrale. La roue d'échappement A est taillée à plat et en étoile, dont les dents sont longues, étroites et aiguës. Sur le limbe de cette roue, plus rapproché du centre qu'à l'ordinaire, on a réservé un cercle de champ B B, dont la plus grande partie est retranchée par l'outil à fendre, pour ne laisser que de petites dents de champ, triangulaires, longues et à face inclinée, comme on le voit à leur plan en *b b*, et en même nombre que les dents de l'étoile, répondant au milieu des vides de celles-ci, et ayant assez de hauteur de champ pour atteindre la virgule ou grande levée *c d* dont il va être question ci-après.

On formait jadis cet échappement avec deux roues plates portées par le même axe, et d'inégal diamètre, ce qui paraît avoir motivé le nom de *Duplex* (double), mais on en a simplifié depuis l'appareil, en n'y employant qu'une seule roue, d'un moindre poids que les deux de première construction, mais portant les deux sortes de dents.

L'axe d'échappement, aussi très-simple, est divisé sur la hauteur en deux grosseurs différentes, que sépare une portée ordinaire. La moitié supérieure de l'axe est à

peu près du diamètre de la portée où se rive le balancier sur son embase. La partie inférieure forme comme un tigeron *g* sortant de la portée du milieu ; ce tigeron est d'ordinaire recouvert d'un petit canon en rubis *e h i*, qu'on nomme aussi *rouleau* (quoiqu'il ne roule pas); il est appuyé du haut sous la portée du milieu de l'axe, et maintenu du bas par une petite virole d'acier *f* chaussant à frottement le bout du tigeron dépassant le rubis ; ces deux pièces sont en outre collées à la gomme laque.

Le canon de rubis a une petite entaille *h i* en hauteur dans le sens de son axe, et dont la profondeur n'atteint pas tout à fait la circonférence intérieure du rubis, pour ne pas le diviser totalement en cette partie. Au-dessus du rubis, sur la partie la plus grosse de la tige, est placée à frottement la sorte de virgule *c d* qu'on nomme *grande levée* et dont l'extrémité *c* est garnie en rubis. Une des lèvres de l'entaille du rouleau forme aussi ce qu'on nomme *petite levée*, dont l'effet précède celui de la grande levée.

Dans le jeu de cet échappement, les dents en étoile appuient leur pointe de repos sur le rouleau de rubis qui ne tourne qu'avec le balancier; mais, d'après la distance de leurs centres, la pointe des dents n'arrive pas à beaucoup près au niveau du centre de l'axe du balancier, car la circonférence que ces pointes décrivent coupe ou pénètre seulement très-peu la circonférence du rouleau, ce qui fait qu'elles ne peuvent passer au delà qu'à la faveur de l'entaille *h i* du rubis, quand celle-ci se présente en tournant dans le sens utile. C'est alors que l'action de la pointe d'une dent d'étoile ayant pénétré d'abord dans l'entaille, forme, lorsqu'elle en sort, ce qu'on appelle la petite levée ; et quand cette pointe en échappe, la virgule ou grande levée se trouve placée de manière à recevoir la chute et l'impulsion d'une des dents triangulaires de champ *b b*, qui entretiennent principalement les grandes vibrations du balancier.

La roue d'étoile, étant d'un plus grand diamètre que la roue des dents triangulaires de champ, n'appuie que légèrement sur les repos de l'axe, mais dans une direction oblique, et non pas en tangente, tandis que les dents de champ, appartenant à un moindre diamètre, n'en ont que plus de puissance d'impulsion ; aussi, avec cet échappement, le balancier fait-il des excursions de plus d'un tour, que ne permettrait pas la cheville ordinaire de renversement. On a suppléé quelquefois à cette cheville par un bras de renversement mobile jusqu'à un arrêt, et porté sur l'axe d'échappement, mais on en a reconnu l'inutilité, et l'on trouve même de l'inconvénient à son contact.

On conçoit, du reste, que dans cet échappement la roue ne produit qu'une impulsion pour deux vibrations du balancier, dont une est dite *muette*, puisque dans celle-ci le retour du balancier se borne à occasionner un léger soubresaut à la pointe de dent du repos lors du passage en ce sens et à gauche de l'entaille du rouleau, et dans laquelle alors la pointe de la dent de repos ne peut pas pénétrer.

1440. Quant aux proportions des parties, elles n'ont pas été déterminées jusqu'ici d'une manière bien précise ; elles ont subi l'arbitraire du peu d'artistes qui employaient d'abord cet échapp., et aujourd'hui même qu'il est plus répandu, ses proportions sont subordonnées à l'opinion particulière de ceux qui l'analysent à leur manière. Nous allons néanmoins réunir ici ce que nous en avons pu recueillir.

1441. Suivant quelques opinions modernes, « le rouleau en rubis doit avoir en diamètre 1/3 de la distance entre les pointes de deux dents de la grande roue de repos; cette même roue doit opérer une levée de 20° sur l'entaille de son rouleau.

« Il convient qu'il y ait une chute de 10° au plus, au moment où la grande roue échappe du rouleau, et où la dent de la petite roue d'impulsion tombe sur la grande levée; cette chute est nécessaire pour qu'il y ait une pénétration suffisante comme d'*engrenage* entre la levée *c* et la dent de champ ou d'impulsion *b;* cette roue d'impulsion doit mener sa grande levée pendant 30 degrés.

« En règle pratique, on donne au *diamètre total* du doigt ou grande levée les 3/4 du diamètre de la roue d'échappement, pour une roue de 12 dents;

« Pour une roue de 13 dents, les 9/13es du diamètre de cette roue; pour une roue de 14 dents, les 9/14es de son diamètre; pour une roue de 15 dents, les 3/5es du diamètre de ladite roue. »

Nous croyons utile de faire observer que souvent la figure des planches ne se trouve pas tout à fait conforme aux mesures, ce qui peut provenir ou de l'inexactitude de la gravure, ou de quelque erreur de chiffre dans le texte; c'est à quoi un lecteur attentif doit suppléer.

On ajoute, du reste, généralement, « que, l'échappement étant planté, la grande levée doit avoir son passage ou son jour bien assuré avec les dents de sa roue d'impulsion, et que le rouleau et la grande levée, souvent garnis de rubis, peuvent, d'après l'expérience, être faits en acier trempé très-dur, sans être sujets à se piquer; mais l'emploi des rubis est toujours plus sûr. »

1442. « Suivant d'autres indications (1), la grande roue de repos ne doit pénétrer dans l'entaille de son rouleau que d'environ 1/12e du diamètre de celui-ci, avec l'impulsion sur la grande levée de 30°, comme ci-dessus, pour une roue de 15 dents. Le rapport entre les deux diamètres doit être de 3 à 2, en sorte que, si la grande roue de repos était de 6 lignes, celle d'impulsion serait de 4 lignes; le rouleau doit avoir pour diamètre 1/16e de celui de la grande roue de repos; l'entaille du rouleau doit avoir 30° d'ouverture, plus l'arrondi de ses lèvres, estimé à part à environ dix degrés pour les deux lèvres. *V. plus loin d'autres observ. jointes à celles de M. Marchand à Tours.*

« Le rapport du rayon de la grande levée avec celui de la roue d'impulsion peut aussi être comme 3 à 5; en sorte que la distance des centres du balancier et de la roue étant divisée en 8 parties, et le rayon de la roue d'impulsion en ayant 5, la grande levée ait les 3 autres parties restantes; mais ces rapports changent avec le nombre des dents de la roue. Le balancier doit parcourir 20° *minimum*, ou 30° *maximum*, pendant qu'une dent de la roue de repos entre et sort de l'entaille du rouleau; avec le

(1) Ces dernières mesures ont été données par M. *Ruggien*, Courlandais, l'un des artistes étrangers les plus habiles que nous ayons vus résider momentanément à Paris, où il était l'un des membres les plus distingués de la *Société chronométrique*. M. *Ruggien* est maintenant établi en Russie. Plusieurs gouvernements de l'Europe ont adopté la judicieuse méthode de faire voyager à leurs frais chez l'étranger, des *Élèves* d'élite, en leur assurant à leur retour un établissement protégé. Nous pourrions peut-être en faire autant, pour ce qui nous manque.

minimum, le balancier arrête moins *au doigt*, mais chemine moins; avec le *maximum*, son arc total est plus étendu, mais l'*arrêt au doigt* est plus facile. La chute de la dent d'impulsion sur la grande levée est portée ici à 10°, selon d'autres de 4 à 5°.

« Pour mettre la pièce d'*échappement*, il faut que le spiral soit monté de manière que la dent de repos se trouve au milieu de l'entaille du rouleau, au point de repos du spiral, et que le balancier ait autant de degrés à parcourir de chaque côté, au delà de son repos, soit pour que la dent entre dans l'entaille, soit pour qu'elle en sorte.

« Pour faire circuler convenablement l'échappement *Duplex* dans des Montres plates, ou qui ont peu de force motrice, il convient de donner 4 parties à la grande roue et 3 parties à la petite, et que l'échappement lève près de 40°, en faisant le balancier d'un poids tel, que la Montre n'arrête pas au doigt sur la grande levée, lorsque le ressort moteur est tout remonté. » Si le ressort tire, l'arrêt au doigt n'a plus lieu.

1443. Nous laissons au lecteur à concilier ces mesures qui nous ont été communiquées, sauf erreur de relation; nous observerons seulement ici que quelques artistes désapprouvent l'appui oblique de la roue de repos sur le devant du rouleau, parce que cet appui tend à repousser les pivots contre les parois de leurs trous. Mais, 1° les trous de cet échappement doivent de toute nécessité être en rubis, pour que la distance des centres ne puisse changer. 2° Certains frottements sur les centres ne paraissent pas empêcher la liberté d'une manière sensible, et cela contre l'apparence ordinaire. L'axe du *tracelet* des outils à diviser a ses pointes pressées assez fortement dans deux haches, en conservant beaucoup de liberté sans jeu; ce qui semble conforme au raisonnement, n'est pas toujours ce qui se passe dans la nature, et l'expérience en décide plus sûrement. *La pointe des dents a parfois un petit plan incliné de contact avec le rouleau.*

L'échappement *Duplex* permet un balancier compensateur et l'isochronisme de son spiral combiné avec les frottements. C'est une transition de l'échappement *à repos* à l'échappement *libre*. Avec des vibrations fort étendues, plusieurs pièces paraissent avoir donné une marche très-satisfaisante pour l'usage civil, sauf le renouvellement de l'huile aux époques convenables. Celle-ci, du reste, se conserve assez longtemps dans la rainure du rouleau. Quelques-uns ne mettent point d'huile à la grande levée garnie en rubis avec roue en laiton, mais on en met avec roue et levée d'acier.

1444. On reproche encore à cet échappement sa fragilité; car, comme le rouleau de rubis doit avoir une épaisseur suffisante pour y pratiquer une entaille, sans le couper tout à fait, et vu que la pointe de la dent de repos, en pénétrant dans l'entaille, ne doit pas en toucher le fond, qu'il faut pourtant qu'elle croise le plus possible sur la circonférence du rouleau, et que l'ébat des pivots ne permette à la pointe de dent de passer qu'à la faveur de l'entaille, il résulte de toutes ces conditions que le tigeron qui traverse le rouleau doit être d'un très-petit diamètre, et d'autant plus flexible ou élastique. Or, cette élasticité, dans le cas d'un choc un peu violent, fait souvent casser le rubis, vu le peu de matière qui reste au fond de son entaille.

1445. Pour obvier à cet inconvénient, nous nous permettrons ici de proposer la suppression du tigeron, en le remplaçant d'abord par un trou assez profond dans le bas de la

partie forte et au centre de l'axe, et du diamètre juste du rouleau; de faire alors un rouleau ou cylindre plein en rubis enchâssé du haut et collé dans l'axe, où il pourrait pénétrer d'une quantité suffisante; le bout inférieur de ce même rubis cylindrique serait emboîté ou chaussé par un petit canon d'acier qui porterait de même pièce le pivot du bas, le tout juste et bien collé. On aurait alors plus de facilité à pratiquer dans ce cylindre de rubis une entaille plus profonde; il resterait presque plein, ou avec des côtés fort épais : la dent de repos pourrait être un peu plus longue et avoir son appui un peu moins éloigné de la tangente. Nous disons *un peu moins*, parce que la pointe de dent ne peut jamais arriver tout à fait à la tangente et croiser jusqu'au centre du rouleau, car elle ne pourrait alors opérer son entrée dans l'entaille. Dans cette construction, les côtés pleins du rouleau, d'ailleurs fort court dans sa partie découverte, nous paraîtraient plus capables de résister à l'effet du choc que le tigeron ordinaire d'acier. L'entaille longitudinale d'un bout à l'autre du rubis servirait à faire pénétrer la gomme laque et à consolider d'autant le rubis dans le trou de l'axe, comme dans celui de la virole du pivot inférieur. Les deux pivots d'ailleurs ne seraient terminés qu'après l'opération et l'emploi de la gomme laque.

Comme il est difficile de tout prévoir dans une première idée, nous soumettons celle-ci à l'examen des artistes habiles, comme celle d'une expérience que l'on pourrait tenter, en y portant les précautions et les soins requis.

1446. On sait qu'avec cet échappement on ne peut employer de *pare-chute* aux pivots, puisque la distance des axes ne permet pas le moindre changement entre eux, ce qui oblige aussi à mettre des trous en pierre à l'échappement. Mais nous avions anciennement imaginé une forme de pare-chute qui pourrait s'employer ici, et contribuer à la conservation du rouleau plein proposé. Le mauvais succès du pare-chute, que l'on a abandonné aujourd'hui, tient principalement à sa trop grande élasticité, qui est son défaut d'origine. Une idée utile peut manquer son effet par la manière de l'appliquer. Il ne faut ici qu'une élasticité insensible; elle suffira toujours pour amortir l'effet du choc. Quand un point frappé d'un corps n'appuie pas directement sur des parties tout à fait inflexibles, au moins relativement, il y a presque assez d'élasticité pour amortir l'effet du coup. On connaît assez la difficulté d'opérer une bonne rivure, si l'on appuie la pièce à river sur une des extrémités d'une bigorne, quoique le bras de la bigorne paraisse inflexible. D'aprés ces observations, nous avions imaginé il y a plusieurs années une forme de *pare-chute* de la figure ordinaire du coqueret ou contre-plaque d'un pivot de balancier. La fig. 5 de la planche XLI suffit pour concevoir ce sujet et voir que la partie qui porte le pivot est extrêmement roide, et trop forte évidemment pour faire ressort d'une manière visible : or, il suffit que le pivot soit porté au bout d'une partie solide, mais assez longue par son pourtour, pour que, bien qu'elle paraisse inflexible, le choc s'y trouve suffisamment amorti. Le défaut des pare-chutes en général provient de ce qu'ils sont trop faibles; ils étaient si flexibles dans l'origine, qu'entre les mains du premier inventeur, au lieu de conserver les pivots, ils ne réussissaient d'abord qu'à les faire casser. C'est donc des pare-chutes de cette construction plus solide que nous pro-

posons pour les deux pivots de l'axe à rubis plein. Ils auraient assez de roideur pour ne pas permettre à la pointe de dent de repos de passer devant le rouleau, pas plus qu'avec des trous dans la platine même, vu le peu de puissance de la roue, et en même temps il leur resterait assez d'élasticité réelle, bien qu'invisible, pour amortir le choc et préserver le rubis plein dont il vient d'être question. Au reste, on ne doit prendre les deux articles ci-dessus que comme des propositions faites à ceux qui auraient la volonté et le temps d'en faire l'essai (1).

ÉCHAPPEMENT A SIMPLE VIRGULE.

1447. Nous ne trouvons cet échappement décrit que dans une édition étrangère de peu de volume et d'étendue. Bien qu'employé avec succès par d'habiles artistes, notamment par *Lépine*, que l'on croit en être l'auteur, il a été presque généralement abandonné pour celui à cylindre, auquel l'ouvrage dont nous parlons le dit néanmoins *supérieur quant aux principes*, parce que, « l'action de la roue sur les repos s'y fait plus près du centre, et avec moins de frottement; mais les levées n'y sont pas égales (on sait aujourd'hui que cette inégalité n'importe pas autant qu'on le croyait alors). Son plus grand défaut est la difficulté de conserver l'huile aux parties frottantes; lorsqu'elle y manque, ces parties sont bientôt détruites, et la marche devient très-irrégulière. » Quelques précautions peuvent cependant y remédier, car on a vu des virgules de *Lépine* conservées comme neuves après un très-long service.

1448. La fig. 6, pl. XLI, offre la roue et sa virgule en perspective; la dent E agit sur le repos intérieur *e e* de la virgule en *a a*, et va commencer son action sur la grande levée *a a*; après qu'elle en est échappée, la dent suivante tombera sur le repos extérieur *k* comme en fig. 7. La virgule étant ramenée par le spiral, la dent *k* agira sur la petite levée *m*, comme on le voit en B, d'où elle tombera au repos intérieur pour agir

(1) Ce perfectionnement facile et simple du *pare-chute* date déjà de nombre d'années; nous l'avons imaginé pour un calibre particulier de Montre que nous avons fait exécuter par *Audemar*, canton de *Vaud*; les pignons y sont tous de douze ailes, jusqu'à celui même de la roue d'échapp., ce qui en rend les dentures très-fines, mais procure d'excellents engrenages. Avec le calibre très en grand de cette pièce sur carton, nous avions dessiné à part le pare-chute dont il est question ci-dessus. Nous eûmes l'imprudence de laisser voir le tout et même de l'expliquer à un médiocre ouvrier tout à fait incapable en Horlogerie et dont le *métier* se bornait à copier et exécuter pour quelques fabriques de Suisse des échapp. à cylindre à bas prix dont il ne connaissait pas les principes; il ne savait pas même calculer le rouage d'une Montre ordinaire à roue de rencontre. Cet homme très-ignorant retint néanmoins l'idée et la figure du pare-chute en question, ainsi qu'une autre construction propre à mouvoir le piton de spiral pour permettre à l'artiste *seul* de mettre une Montre dans son échappement juste, sans rien démonter. Cet ouvrier se permit d'exécuter ces pièces à notre insu et eut le front de les porter à une Société de sciences et arts, comme de son invention. Mais il ne sut pas en expliquer l'usage ni le but; le rapport fut fait en conséquence, c'est-à-dire tout opposé aux idées du véritable auteur. L'individu coupable de cette supercherie, l'erreur du rapport, et le sujet même, ne nous parurent pas mériter la peine de réclamer, ni de nous en occuper davantage. Cette anecdote peu importante n'est rapportée ici que pour rappeler aux inventeurs trop confiants que, si l'ignorance et l'incapacité peuvent réussir par l'intrigue, elles peuvent aussi répandre des idées fausses et même nuire dans d'autres cas. D'après cette démarche hardie, cet intrigant trouva assez de protection pour former, à l'aide d'ouvriers peut-être moins ignorants, un établissement en très-belle place. Puis *fiez-vous aux apparences*.

peu après sur la grande levée, etc. La tige demi-cylindrique de la virgule est entaillée au-dessus et au-dessous, un peu au delà du repos, pour n'être pas atteinte par les dents; il ne reste pour la manivelle que la partie *k d*, vue en plan ou en coupe, fig. 7. Le cylindre d'acier qui porte la virgule de même pièce est percé dans sa longueur d'un trou égal à la largeur des dents, avec un peu de jeu; ce trou reçoit un peu à force les deux tigerons des pivots; celui du haut a de plus sa portée pour la rivure du balancier. La longueur de la virgule de *k* en *l*, compris son repos extérieur, doit être égale au vide entre deux dents, moins un petit jeu. La levée totale est de 40°, dont 10° pour la petite levée *m*, et 30° pour la grande. La partie extérieure des dents demi-cylindriques passe au centre de l'axe. Au repos du spiral, la dent doit pouvoir agir également sur les deux levées; la distance de *e* à *g* doit être 30°, fig. 7, et la différence des deux levées rend la distance des deux coups un peu boiteuse. La courbe des levées se trace avec un rayon de la roue dont on cherche le centre. On adoucit tous les angles. La virgule doit être trempée au plus haut degré, avec un poli parfait aux parties frottantes, comme aussi aux surfaces voisines, pour ne pas attirer l'huile. L'auteur de cet article pense qu'une roue d'acier pourrait conserver l'huile plus pure; la roue est d'ordinaire en laiton. Les dents un peu hautes et l'huile ménagée évitent son extravasion.

ÉCHAPPEMENT A DOUBLE VIRGULE.

1449. Cet échappement, fig. 8 et 9, porte d'un côté la virgule ci-dessus, mais dépourvue de son repos extérieur. Une seconde virgule s'y trouve opposée à la précédente, mais assez au-dessous pour que le limbe de la roue passe entre elles sans contact; ce limbe est garni en dessus et en dessous de simples demi-chevilles alternées; l'une de dessous tombe dans le repos de la virgule inférieure *b*, quand celle de dessus échappe à la pointe *a* de la virgule supérieure. Il y a 20° de levée de chaque côté. Les dents sont parfois découpées en cœur portant deux chevilles; mais nous préférons celles en forme de T, comme dans la fig. 8, qui permet de plus grands arcs à la manivelle pointillée en *a b c*, mais qui devrait être à l'arrière de la fig. 9. Dans notre construction, assez différente de celle de son origine, les virgules peuvent être de rapport et montées sur les bouts des tigerons, ce qui permettrait au besoin leur exécution en rubis. Cet échappement vibre beaucoup et règle bien. La levée extérieure à la roue devant être concave, comme à la virgule simple ci-dessus, la levée intérieure doit être convexe et du même rayon que celui de la roue. La dispute sur la priorité d'invention entre *Beaumarchais* et *Lepaute* fut portée devant l'Académie, qui jugea en faveur du premier. *Romilly de Genève* prétendit avoir réduit les repos au diamètre d'une cheville pour diminuer le frottement de ces repos qui étaient plus grands dans *Lepaute*. Ceux-ci auraient été néanmoins mieux d'accord avec l'expérience actuelle, qui exige un certain degré de frottement, comme compensateur ici de l'inégalité de tirage du barillet denté, surtout avec le spiral ordinaire. La réduction extrême des repos aurait exigé un balancier compensateur et un degré d'isochronisme du spiral, peu connus à cette époque, au moins pour l'usage civil. *Les cercles des T sont trop grands dans la fig.* 8.

D'une autre disposition du cylindre en rubis.

Pour compléter ce qui concerne l'échapp. à cylindre, nous mentionnerons encore une autre disposition où la tuile en rubis est placée à l'extrémité de son axe, au delà même du pivot de ce côté. La sorte de manivelle qui dépasse son pivot, chargé ici de tout l'effort de la roue, et qui n'a guère été pratiquée que par son auteur, exige un trou foncé si petit, que le peu d'huile qu'il peut recevoir ne s'y conserve pas. Cependant il faut remarquer que, d'autre part, la forme *cônoïde* du plan d'impulsion de la dent de roue, paraît très-propre à attirer à son bord frottant jusqu'à la dernière molécule d'huile si nécessaire en ce point, ce qui ferait désirer que cette forme avantageuse en ce sens pût être appliquée au cylindre ordinaire modifié en conséquence; cet avantage ne remédie point, du reste, à la destruction de l'huile du trou foncé, mais nous entendons ici que les trous seraient ceux ordinaires en rubis.

Il est plus facile de perfectionner les idées de nos prédécesseurs, ou de nos contemporains, déjà reconnues bonnes de fond, que d'en créer de nouvelles sans défaut et en suivant toujours les vrais principes; quand ceux-ci sont négligés, on peut séduire d'abord, mais à la longue on n'est pas imité ni approuvé par les artistes instruits dans la théorie et dans la pratique de leur art, et qui sont les seuls juges compétents dans cette matière, après toutefois que les rivalités, les préventions, l'intrigue et tous les motifs secrets et *excentriques* sont dissipés. Il faut le temps et l'expérience pour mettre le sceau véritable aux réputations. Cette opinion ne sera pas du goût de bien des gens, mais elle n'en est pas moins celle des vrais artistes de tous pays, dont nous ne sommes ici que le fidèle interprète.

Quant à nos jeunes lecteurs, nous leur rappellerons qu'en s'attachant trop à la grâce extérieure, aux effets curieux, à une symétrie inutile au mécanisme, on s'expose à négliger les principes essentiels et sévères de l'exacte mesure du temps; celle-ci était le seul but des *Graham*, *Leroy*, *Robin*, *F. Berthoud*, *Lepaute*, *Lépine*, etc., dont les principaux ouvrages seront toujours estimés; quant à celui qui, privé de toute instruction solide, n'est adroit qu'à se faire valoir en s'attribuant les idées des autres, sa vogue finit avec lui. L'ambition de passer pour *inventeur* est souvent le travers de l'ignorant; il essaye une foule de constructions sans principes, hasardées comme des numéros à la loterie, sans réfléchir que, pour innover dans un art difficile, il faut avoir étudié à fond et être capable d'apprécier tout ce qui a été tenté sur le sujet. Il est aisé d'en imposer par la nouveauté, la singularité, jointes à la brillante exécution d'ouvriers habiles, et appuyées d'ailleurs par la prévention et la faveur; mais le temps fait justice de ces subtilités (1), comme des compositions bizarres multipliées sans motif raisonné, tout cet étalage ne procure qu'une vogue éphémère, et heureusement pour l'exemple, comme l'a dit un poëte célèbre :

Il est bien rare, avec un tel bagage,
De parvenir à la postérité.

(1) On sent bien qu'il ne s'agit pas ici du talent d'amuser la société par des phénomènes mécaniques qui ont toujours leur prix comme leur agrément, et prouvent l'habileté du mécanicien.

Observations sur les échappements qui précèdent.

1450. On a dit ci-dessus que le lecteur intelligent doit suppléer à certains détails que le texte fait pressentir aisément, comme aussi à l'insuffisance inévitable des figures pour la précision. Sous un point de vue général, on ne devrait s'occuper de ces derniers échappements que quand on est en état de raisonner cette matière sous les rapports physiques, mécaniques et même logiques, soit par l'expérience acquise dans la perfection des autres parties, soit par la méditation générale d'échappements usités. C'est pourquoi les artistes actuels sont placés vers la fin de ce traité. Cependant on peut, en réfléchissant sur les plus simples de ceux que nous venons d'expliquer, tels que ceux à cylindre, à chevilles, à ancre, les exécuter passablement en copiant de bons modèles, ou seulement en imitant et réduisant avec attention et correction nos figures. Mais, pour les suivants, dits échappements *libres*, il faut y joindre une aptitude plus générale pour ces mêmes principes de mécanique, appliqués plus scrupuleusement encore aux détails, en ne négligeant rien dans la main-d'œuvre de toutes les parties en action. C'est alors que tout artiste mécanicien doit observer les conséquences obligées de principales conditions établies dans l'explication. Ceci bien compris, nous allons procéder à l'exposition des échappements libres, mais seulement après que nous aurons ajouté quelques remarques utiles sur les articles précédents, comme exemples d'application d'une partie des observations que nous venons de faire.

1451. Dans l'échappement *Duplex*, la grande levée *c d*, fig. 3, pl. XLI, peut aisément avoir une forme différente de celle un peu massive de cette figure ; il suffit qu'elle retienne solidement la pierre ou rubis *c* dans la direction de sa face de levée au centre de l'axe du balancier. On peut donc déjà la tenir plus légère ; elle porte un prolongement ou canon en virole, vu en *a* du profil, fig. 4. Pour tourner à volonté cette virole de grande levée établie à frottement dur sur son arbre, et déterminer ainsi le point où cette levée sera atteinte par la dent de champ de la roue d'impulsion, on fait à la partie ronde du haut de la virole, en deux points opposés, une encoche oblongue parallèle au plan ; puis, la pièce étant déjà trempée, on saisit les deux encoches, parallèles aussi entre elles, avec les angles d'une petite pince à couper, afin de faire tourner d'une main la virole avec sa levée de même pièce, tandis que l'autre main tient le balancier. Cette méthode, propre à prévenir les accidents, se pratique à presque toutes les pièces rondes au dehors qui sont placées à frottement dur sur l'axe d'un balancier.

Quant aux dents de la grande roue du repos, on voit que leur flanc, à l'arrière de leur action, est dirigé seul au centre de la roue, et que le flanc de l'avant est un peu incliné sur l'arrière ; mais on peut tenir ces dents en étoiles droites, ou même inclinées en avant, quand on pratique à leurs pointes un petit plan incliné frottant au rouleau, ce qui adoucit le soubresaut occasionné à la dent par l'entaille en hauteur du rouleau, lors du retour du balancier dans la vibration muette (voyez la phrase en italiques, fin de l'article 1443).

La roue Duplex de repos porte d'ordinaire 12 à 15 dents, et celle d'impulsion au-

tant; c'est leur nombre qui détermine pour chaque roue la somme de degrés de l'angle entre deux dents voisines, et dont le sommet est au centre de la roue. Tout cercle, grand ou petit (article 232), étant toujours divisé en 360°, les pointes de deux dents consécutives d'une roue de 15 dents forment entre elles et avec son centre un angle de 24°. Aux roues de 12 dents, l'angle est de 30°, et à proportion pour les nombres intermédiaires, ou autres.

Il convient toujours pour sûreté de tracer les échappements en grand d'après nos figures, et toutefois suivant le nombre de dents adopté, en tirant d'abord sur un calibre provisoire, en carton fin, une ligne des centres de longueur indéterminée. On y marquera d'abord la distance des deux centres, du balancier et de la roue, d'où ici, comme sommets, on tracera deux angles *opposés par leur arc*, l'un de 24° ayant son sommet au centre d'une roue de 15 dents, par exemple, l'autre de 40° pour la grande levée, et ayant son sommet à l'axe du balancier; ces deux angles se trouveront partagés à leur milieu par la ligne des centres, et les deux intersections ou croisements de leurs côtés donneront les deux portions de cercle de la petite roue d'impulsion et de l'extrémité de la grande levée, dans toute l'étendue de l'action de celle-ci. Le croisement ou empiètement mutuel des deux arcs de cercle donnera la quantité de pénétration de la menée sur la ligne des centres. Alors la pointe des dents de la grande roue de repos, arrivant au fond de l'entaille du rouleau, détermine son rayon, et par suite le rapport de ce rayon avec celui de la petite roue d'impulsion qui porte ses dents de champ, que l'on conçoit, par leur plan et par une indication de leur profil, devoir être triangulaires dans leur élévation. On réduira en petit les dimensions principales de ce tracé, sur le calibre d'exécution en laiton dressé et adouci, suivant la proportion du rouage et l'espace disponible. Le diamètre de la roue de repos est un peu arbitraire et ordinairement le même ou à peu près que celui de petite moyenne du rouage, et plutôt un peu plus que moins. On ébauche d'abord le tout en laiton, pour essai, en replaçant les pierres dures par des parties d'acier, qui pourront ensuite servir de modèle au *pierriste* pour la dernière exécution définitive.

Dans le profil, fig. 4, de l'échappement Duplex, deux des dents de champ ou d'impulsion *b b'* sont seulement indiquées; celle *b'* qui mène la grande levée est placée trop près du centre du bal.; elle ne doit être engagée avec la grande levée, sur la ligne des centres, que d'environ 2/3 de la largeur de sa face inclinée, ainsi qu'on peut en juger par le plan plus exact. Lorsqu'il y a beaucoup de chute, comme dans ce plan, le rubis à la grande levée est indispensable. On peut diminuer cette chute pour éprouver la position de la levée qui, à l'égard du repos du spiral, peut donner les plus grands arcs de supplément, qu'il faut toujours procurer à cet échappement (1).

(1) A propos des échappements usuellement employés en horlogerie et pour en compléter la nomenclature, nous croyons indispensable d'entrer dans la description de quelques-uns de ceux inventés ou perfectionnés par M. *Paul Garnier*, dont l'auteur avait omis de parler dans la première édition de ce traité.

Nous citerons d'abord l'échappement à repos, vertical, inventé par M. *Paul Garnier* en 1830, dont les dispositions simples et les moyens d'exécution prompts et faciles lui ont permis, en l'appliquant aux

1452. Dans l'échappement de *Lépine* à simple virgule, fig. 7, même planche. les dents *k* et *g* de la roue, indiquées en plan, ne sont pas assez épaisses; elles doivent former, du côté du centre de la roue, à peu près un demi-cercle, pour conserver plus de solidité. Le plan ou coupe de la manivelle en B, en forme de navette courbe d'un seul

Pendules de voyage de généraliser à cette époque, ce genre d'Horlogerie, qui a pris aujourd'hui un si grand développement.

Cet échappement se compose de deux roues planes, fixées à une certaine distance sur un même axe horizontal. Chacune de ces roues porte 6 dents terminées par une arête convexe inclinée de 15 degrés sur la circonférence. Elles sont montées sur leur axe commun de telle manière que la pointe d'une dent d'une roue partage également l'intervalle entre deux dents de l'autre. L'axe du balancier est vertical et porte à la hauteur du diamètre horizontal des deux roues décrites ci-dessus un petit plan circulaire très-mince (ou tranche), ouvert de 180° environ du côté de ces roues et dont les ouvertures sont terminées en lèvres telles que celles d'un cylindre.

On conçoit facilement qu'à chaque oscillation du balancier l'une des dents d'une roue quittera la tranche de repos; le plan incliné de cette dent rencontrera la lèvre, qu'elle poussera jusqu'à la fin de la levée: à ce moment elle échappera; une dent de l'autre roue viendra faire repos sur le côté opposé de la tranche, jusqu'à ce que, le balancier revenant sur lui-même, la lèvre vienne se présenter pour recevoir une impulsion dans l'autre sens, et ainsi de suite.

Les principes géométriques de cet échappement diffèrent très-peu de ceux de l'échappement à cylindre, l'inclinaison des dents des roues varie suivant le nombre de dents, l'ouverture de la tranche de l'axe d'échappement correspond à l'ouverture du cylindre, et enfin la forme des lèvres est encore semblable à celles du cylindre; la différence consiste en ce que le repos se fait sur le plan horizontal de la tranche, et l'effort a lieu sur le bout du pivot inférieur, au lieu de se produire sur une portion de cylindrique et de presser les pivots contre les parois des trous.

Le deuxième échappement est un échappement libre à force constante que M. *Paul Garnier* à appliqué aux chronomètres, et dont les dispositions sont telles que le balancier décrit des arcs rigoureusement égaux, quelles que soient les imperfections du rouage et les irrégularités de la force motrice; cette propriété de n'exiger qu'un rouage ordinaire permet d'établir les chronomètres à des prix très-modérés, puisqu'il dispense des soins minutieux qu'on est obligé d'apporter dans la construction des rouages de chronomètres à détente. M. *Garnier* a appliqué cet échappement à un régulateur de cheminée qui donne la seconde avec un pendule demi-seconde; une petite masse restitue, à chaque deux vibrations, au pendule la force que les frottements et la résistance de l'air lui ont enlevée; le rouage n'a plus qu'à relever cette petite masse après chaque impulsion.

De cette façon le pendule conserve la même amplitude d'arc, puisqu'il est soustrait aux variations de la force motrice, ce qui permet à ce genre d'échappement de donner une très-grande régularité.

M. *Garnier* a aussi perfectionné un échappement libre à coup perdu, dont l'idée primitive appartient à *Berthoud*. En modifiant la forme des dents de la roue d'échappement, en en changeant le mode de repos, ainsi que la manière d'opérer le dégagement, il en a fait un échappement construit dans les principes géométriques et dont les résultats sont très-satisfaisants.

Ne pouvant parler en son lieu de la compensation de M. *Garnier*, nous allons tâcher de faire comprendre en quelques mots tous les avantages qu'elle offre comme facilité de réglage et comme simplicité de construction. Elle diffère des compensations à leviers jusque alors en usage, en ce qu'en ces derniers les barres du métal le plus dilatable, agissant sur des leviers convenablement disposés, permettent le soulèvement ou l'abaissement de la lentille pour maintenir à la même distance le centre d'oscillation; dans cette compensation, au contraire, aucun déplacement de la lentille ne s'opère. Les deux leviers portent sur leur grande branche chacun une boule métallique, qui est relevée par l'allongement des barres les plus dilatables, et abaissée par la contraction de ces barres, ce qui maintient au même point le centre d'oscillation de tout le système. Le réglage de la compensation se fait avec la plus grande facilité, puisqu'il s'agit d'éloigner ou de rapprocher les deux boules du point d'appui de leur levier respectifs.

Nous signalons encore le Michromètre, donnant une approximation à $1 \frac{1}{8000}$ de millimètre;

Le Sphygmomètre, pour reconnaître les mouvements artériels du sang.

Le Thermomètre à minima et à maxima, le Compteur à Horloge, les Indicateurs dynamomètres, les Totalisateurs, etc., etc., ainsi que les outils pour la fabrication des pièces détachées; instruments tous

côté, n'offre pas assez de corps, et son épaisseur peut être augmentée du côté du repos circulaire extérieur; il suffit que les dents de la roue ne puissent toucher à la manivelle en frottant sur les deux repos.

1453. A l'échappement à double virgule, fig. 8, les dents de sa roue découpées en T ont leurs extrémités formées en cercle d'un trop grand diamètre; il doit être réduit afin de laisser la manivelle *a b c*, fig. 9, pénétrer librement et sans accoter dans l'intérieur de la dent, pour faciliter ainsi la liberté des plus grands arcs de supplément. Cette manivelle pointillée de profil dans la fig. 9, et placée là, par supposition seulement, en arrière des deux virgules, pour la mieux indiquer, doit en réalité se trouver sur le côté et derrière le repos de la virgule extérieure *a*, telle qu'on la voit en plan dans la fig. 8, en un point opposé à celui de *b*, et au milieu du dehors de la roue au moment de repos du spiral.

Dans cette même fig. 8, les repos, ou têtes des virgules, sont trop prolongés (trop crochus), ce qui empêcherait les chevilles de tomber nettement dans les repos, lors des petits arcs. On verra, dans une exécution provisoire ou d'essai, ce qu'il faut retrancher de l'intérieur, en flûte et en arrivant insensiblement à se confondre avec la petite partie restante du repos qui circulera autour de la demi-cheville; car la cheville suivante ne doit pas pouvoir toucher à cette coupe qui reste à faire, et cela même un peu avant que la cheville qui précède ait achevé sa levée sur l'autre virgule. On ne peut guère connaître la quantité juste du retranchement ultérieur de cette partie du repos, qu'en faisant fonctionner lentement cet échappement et en conduisant le balancier au doigt. On tire parfois les deux virgules et leurs supports d'une seule pièce d'acier, ce qui augmente beaucoup la difficulté de leur donner la forme régulière voulue, et rend presque inexécutable leur remplacement en rubis; mais on conçoit qu'étant rapportées comme dans nos figures, l'emploi des rubis est très-praticable. Le même rubis de chacune pouvant porter sa partie cylindrique de même grosseur que l'axe percé d'un bout à l'autre, et être monté sur un des bouts de chaque tigeron arrivant jusque-là, où l'on peut le coller en laque, il peut y être retenu par une très-petite goupille d'acier implantée dans la manivelle, et dont le dehors peut être noyé dans une entaille formée sur le plat des virgules; ou bien par une entaille dans la manivelle où entrerait le dehors saillant des repos, en ne faisant pénétrer les tigerons dans les virgules qu'en les collant, ce qui préserverait le limbe de la roue de tout contact. Quant à la roue, ou seulement à ses chevilles (coupées à moitié, comme il a été dit), elles peuvent être avantageusement formées d'un alliage de deux parties d'argent pur, et d'une partie en or à 18 carats, c'est-à-dire déjà allié d'un quart de laiton pour que l'huile reste plus longtemps pure. Généralement et avec des pierres,

dus à l'invention de M. *Garnier* et qui lui ont valu deux médailles d'or, et enfin l'invention de l'Horlogerie électrique, dont nous espérons pouvoir parler plus longuement.

Nous devons encore exprimer ici notre reconnaissance de la communication qu'a bien voulu nous envoyer de Tours M. *J. Marchand*, vice-secrétaire de la Société d'agriculture, sciences et arts d'Indre-et-Loire; lequel, en amateur éclairé de l'art de l'Horlogerie, nous a adressé sur notre demande son mémoire manuscrit sur *l'échappement Duplex*, contenant des recherches profondes et délicates tout à fait particulières, traitées *ex-professo*, et confirmant parfaitement l'opinion des auteurs les plus habiles que nous ayons remarquées sur ce même sujet.

les roues ou les chevilles seules peuvent être en acier trempé très-dur, et bien poli; mais les parties frottantes doivent ici rester un peu grasses pour prévenir l'oxydation et l'érosion.

Il paraît que cet échappement exige des chevilles un peu fortes, et par suite des repos d'un rayon assez grand pour produire un degré de frottement utile à la compensation des variétés de force motrice. Il doit en être ici comme du cylindre qui, avec la proportion convenable de diamètre, compense assez bien pour l'usage civil la différence presque double du haut au bas d'un ressort à fusée *modifié* et placé dans le barillet denté, et bien préférable au ressort diminué du dehors. Cette augmentation du diamètre des chevilles, indiquée par l'expérience, est bien opposée au sentiment de *Romilly*, qui se félicite dans l'Encyclopédie d'avoir le premier réduit les arcs de repos à n'admettre que la plus fine cheville. Il paraîtrait, au contraire, que les chevilles de la roue pourraient avoir avantageusement, au moins une fois et demi, le diamètre des pivots ordinaires de cette même roue; mais c'est une expérience spéciale encore à faire, car cet échappement a été trop peu exécuté. En général, si l'on réduit à l'extrême le frottement des *repos* dans les échappements *de ce nom*, on tombe dans la nécessité du balancier compensateur, et du spiral doué d'un degré d'isocronisme combiné avec ce qui reste de frottements dans l'échappement, équilibre qui ne se soutient pas longtemps par le changement de fluidité de l'huile, et qu'on ne recherche guère pour l'usage civil, vu la facilité du renouvellement de celle-ci dans les Montres simples, au moyen du nettoyage ordinaire.

1454. On voit donc que les proportions rigoureuses des pièces ne peuvent être fixées définitivement d'après la seule gravure, qui n'est qu'une première indication de forme et de position, et bien moins encore quand les figures sont en perspective. Mais on tient d'abord les dimensions un peu plus fortes que celles du dessin géométral, soit en plan, soit en élévation ou profil, les seuls que l'on puisse mesurer, et l'essai d'une exécution provisoire ainsi que la méditation du texte enseignent à les mettre entre elles dans un juste rapport. Ainsi les dents de la roue de cylindre, pl. XL, ont évidemment leurs colonnes trop hautes; la longueur de leurs plans inclinés ne peut être mesurée, même sur le profil géométral, parce que la plupart ne se présentent qu'obliquement. Mais la proportion en est assez juste dans le plan plus en grand des fig. 7 et 10; le tampon du bas du cylindre n'a pas assez de diamètre, comparativement à celui du haut; la roue ébauchée fig. 9 ne porte que 9 dents au lieu de 10 indiquées justement dans le texte, parce que cette inexactitude est aussi dans Berthoud, et que le graveur, n'étant pas Horloger, a oublié cette correction à faire. Mais cette erreur importe peu, vu l'exactitude du texte, où nous avons corrigé d'ailleurs un faux nombre de Berthoud, et parce qu'il ne s'agit ici que de la manière d'ébaucher la roue. Il en est de même, plus ou moins, dans les autres figures d'échapp. Il faut donc être assez mécanicien pour y suppléer au moyen d'un jugement déjà exercé, c'est ce qui nous a fait dire qu'il ne convient pas à tout le monde de se livrer à ce travail, et à quoi s'applique aussi l'ancien proverbe, *Non licet omnibus adire Corinthum*, que nous avons cité et traduit ailleurs (213).

De l'échappement LIBRE A ANCRE *de la plus simple construction.*

1455 Les fig. 1 et 2 de la pl. XLII représentent cet échappement tel qu'il est pratiqué le plus communément dans les pièces ordinaires de ce genre pour l'usage civil. Il nous a paru avoir été publié en France pour la première fois vers 1792-93 par R. Robin, habile artiste, à qui l'on en attribue la première invention que nous avons déjà citée (art. 1159). La menée n'y avait lieu que dans une vibration sur deux; l'autre vibration, dite muette, était une simple préparation avec légère progression de la roue. L'égalité des deux levées paraît appartenir à l'habile artiste anglais *Th. Mudge*, et c'est la construction actuellement adoptée, avec 20° de levée du balancier de chaque côté, ou 40° de levée totale.

1° Dans le plan, fig. 1, pl. XLII, de l'ancre libre *a b*, celle-ci est fixée sur le même arbre que la partie nommée fourchette en *f d*. Dans quelques autres constructions l'ancre et la fourchette, toujours de deux pièces, se touchent immédiatement, et la fourchette, beaucoup plus large, couvre entièrement l'ancre, ayant des bras peut-être plus courts; ce qui semble avoir pour but de former dans les angles de cette réunion un réservoir naturel pour l'huile, si nécessaire quand les bras de l'ancre ne sont pas garnis en rubis. La roue R est simplement en étoile à dents inclinées de 5° environ, sur le rayon virtuel *v v* de la roue. Le cercle *o* est monté à frottement dur sur l'arbre du balancier, et porte vers *d* un doigt qui s'engage à chaque vibration dans l'entaille *d* de la fourchette en la menant alternativement à droite et à gauche, et avec elle l'ancre *a b*. La dent de la roue reste arrêtée d'abord sur les repos pendant l'arc supplémentaire du balancier pour en être dégagée et agir sur les levées dans la dernière moitié de l'engrènement du doigt *d;* la fourchette, sollicitée au premier instant par le balancier pour dégager les repos, pousse dans l'instant suivant le balancier pour lui restituer sa force perdue, restitution indispensable dans tous les échappements. Ici l'action entre la fourchette et le bras du balancier n'a lieu que pendant une très-petite portion de l'arc total de ce balancier, qui continue de faire de grandes excursions libres, et au total de plus de 360°; l'arc total de levée du balancier n'est que de 50° à 60° au plus; le reste parcouru par lui sans aucun contact dans ses longs suppléments, n'a d'autre frottement que celui de ses pivots, ni d'autre résistance que celle du spiral et de l'air ambiant, résistances qui sont les moindres dans tous les cas; en sorte que si le balancier n'est pas absolument *libre* comme le nom de ces échappements l'indique, il est du moins beaucoup plus libre que dans tous les autres, et autant qu'il lui est permis de l'être avec une ancre.

L'extrémité élargie de la fourchette en *f* a pour but de contre-balancer le poids des parties en *d* et des bras de l'ancre, en disposant le tout en ce sens avec les soins ordinaires. De fortes chevilles ou plots en laiton ou acier *c p*, implantés dans la platine, bornent le mouvement de la fourchette et de l'ancre. Les repos de l'ancre sont un peu en pente vers l'arrière pour occasionner aux dents un recul imperceptible dans leur dégagement; c'est ce que l'on nomme *tirage*, afin d'assurer l'appui de la fourchette contre ses plots et prévenir le contact accidentel de l'enfourchement avec le cercle *o* pendant la partie libre de la

vibration. Ce tirage se pratique toujours dans les diverses constructions de ce genre comme *sûreté*. Les dents ne s'engagent sur les repos que de 3° à 4° au plus, et souvent moins, d'après le calibre adopté. L'ancre et la fourchette doivent être d'équilibre en tout sens sur leur axe commun. (*Et une dent y échappant, l'autre est au repos*).

Dans le profil, fig. 2, *f d* est l'épaisseur de la fourchette; *a b* est l'ancre derrière laquelle la roue moins épaisse se trouve pointillée; *c c* est le centre de l'axe; *s* est l'assiette où se rive le balancier placé suivant le calibre au-dessus ou au-dessous du cercle *o*, dont le doigt en *d* est engagé dans la fourchette; ce doigt est rétréci en arrière et dégagé par deux entailles où pénètrent les deux branches de la fourchette, afin qu'il puisse y avoir son entrée libre et avec un léger ébat; tous les angles y sont arrondis modérément. Les parties extérieures de l'enfourchement ne doivent pas non plus pouvoir toucher au cercle dans toute l'étendue de la vibration, et un petit jour y est réservé pour cette raison tant que la tête de la fourchette reste appuyée sur ses plots. Les pivots *p p* sont indiqués avec portée ordinaire, mais celle-ci ne doit point frotter aux ponts ni à la platine, la longueur des pivots et le placement des contre-plaques ou coquerets devant y pourvoir. Cette construction, la plus simple, est celle des fabriques de *Liverpool* en Angleterre; mais dans les ouvrages anglais un peu supérieurs on emploie la figure suivante, plus recherchée (*où, fig. 3, la dent entre* R *et* p *devrait être plus reculée*).

1456. 2°. Les fig. 3 et 4 représentent le même échappement libre à ancre, mais pourvu de plus de précautions. La fourchette est de la même pièce que l'ancre, ce qui allégit le tout; l'enfourchement pour le doigt y porte deux cornes extérieures plus étendues qui ne doivent non plus jamais toucher au doigt ni au cercle, à moins d'un choc accidentel qui détacherait l'ancre de ses plots; les cornes mettraient alors momentanément le doigt *d* dans le cas de rentrer sans difficulté dans l'entaille de sa fourchette; ce doigt est ici formé en cheville de rubis, collée dans un trou du cercle, et la fourchette porte de plus une languette de sûreté en *l*, rapportée avec vis et pied au-dessus de l'enfourchement. La languette passe sans toucher dans l'entaille d'un noyau de sûreté *n n* en acier, placé à frottement sur l'axe du balancier pour prévenir au besoin le désengrènement de la fourchette; et, soit au passage de la languette dans l'entaille du noyau, soit pendant la partie libre des vibrations, la languette conserve toujours son petit jour entre elle et le noyau de sûreté. Les dents de la roue R portent à leur extrémité un élargissement dans le sens du plan, dont l'incliné continue l'effet de levée sur l'ancre, et retient plus sûrement l'huile nécessaire aux levées. La fig. 4, qui est le profil de cet échappement, indique à peu près l'élévation en cage des parties respectives. Les pivots *p p* du balancier sont ici sans portée, et leur forme en trompe vers la tige prévient mieux leur rupture. Cette construction, plus soignée et plus ouvragée, est préférable à la précédente; les levées et tous les pivots d'échappement y frottent ou roulent toujours sur rubis. On en met même à d'autres derniers pivots du rouage, mais il n'en faut pas aux premiers mobiles ni à la roue du centre.

1457. La fig. 5 est tracée en plan seulement; le profil est aisément suppléé par ce qu'on vient de voir dans les précédents articles; c'est une construction plus délicate em-

ployée dans ces derniers temps en Suisse et sur le continent pour les Montres de haut prix. L'échappement libre à ancre est peu employé dans les pièces marines à longitude, quoiqu'il y ait parfois réussi, et l'échappement libre à détente-ressort et à cercle, dont nous nous occuperons ci après, y est généralement préféré.

L'ancre *a b* est ici à angle droit avec sa fourchette *f l*, plus longue et d'autant moins affectée de l'inégalité forcée des bras *a b*. En place de plots, les deux bras *l r* maintenus par une vis et un pied en *l*, battent sur la tige même de la roue R, ce qui change leur point de contact à chaque vibration et peut y prévenir l'adhérence; *g* et *h* sont les rubis engagés et collés aux extrémités des bras de l'ancre. Les dents de la roue, laissées encore plus larges ici sur l'arrière, forment une forte partie de la levée, comme on le voit dans leurs divers degrés d'action progressive représentée en *i k l m n*. Le doigt de dégagement en rubis, implanté dans le bras *d* porté par l'axe du balancier, n'est pas en forme de cheville comme le précédent, mais aplati en forme d'olive *d* afin de diminuer l'étendue de son contact avec les parois droites de la fourchette, qui ne sont touchées que par les angles suffisamment arrondis de cette forme d'olive, ce qui diminue le collement produit à la longue par l'épaississement du peu d'huile toujours nécessaire. Ce rubis en olive porte dans le bas un tenon carré et moins large, placé et collé dans un trou du bras ou doigt de dégagement, prolongé un peu au delà en forme de demi-cercle pointillé ici pour ne point embrouiller la figure. On voit en A la situation droite de la fourchette vers l'instant où le bras *d*, de *menant* qu'il était d'abord, va devenir *mené* par la fourchette. On voit en B le moment de l'attaque de la fourchette par la pierre en olive du bras *d*, et enfin en C le bras libre ainsi que son balancier dans leur arc de supplément. L'ancre et la fourchette n'ont que 10° de mouvement de chaque côté de la ligne des centres, mais le balancier a, par le propre rayon du doigt, 25° de chaque côté en action de levée et impulsions dans quelques constructions, total 50 pour le tout et parfois jusqu'à 60, ce qui dépend du rapport de longueur de la fourchette depuis son centre de mouvement en *l* avec celle du rayon du bras *d*. La pénétration des dents de la roue sur les repos est de 3 à 4 degrés; l'inclinaison en arrière des repos ou *tirage* est au plus de 2° ou 3°. Les deux vibrations totales du balancier embrassent environ un tour et 1/4 et plus. La figure indique assez le surplus de ces observations tel que le doigt de sûreté *s* en forme de flèche évasée; les cercles pointillés en A B C désignent le noyau de sûreté auquel ne doivent pas toucher les deux cornes de précaution de la fourchette, ni son doigt de sûreté, à moins qu'en cas de forte secousse. Nous avons déjà observé que généralement et pour la régularité de la marche, l'échappement libre à ancre devrait toujours avoir un balancier compensateur avec un spiral pourvu du *degré voulu* d'isochronisme, sans lesquels il se trouve plus ou moins assujetti aux inégalités de la force motrice et de la température.

1458. Les échappements employés aujourd'hui à cylindre, à ancre, *Duplex*, et ceux quelconques à chevilles applicables aux Montres ou aux Pendules, et dont nous avons parlé ci-dessus avant l'échappement libre à ancre, terminent nos observations sur cette partie des instruments à l'usage civil. Celui à ancre libre commence déjà à appartenir aux *chronomètres* ou *garde-temps*, et les suivants sont plus spécialement destinés à l'observation.

Mais pour achever ce que nous avions à dire sur ce qui concerne l'usage civil, nous sommes forcé de donner ici le complément des conditions générales qui contribuent au succès. Quelque suranné que puisse paraître aujourd'hui un résumé de cette espèce, interrompu dans notre premier volume, puisqu'il y a été commencé, il doit être achevé ici comme plus utile qu'on ne le pense souvent, et d'ailleurs pour n'y plus revenir. C'est, comme on va le voir, un moyen abréviatif pour une foule de recommandations qu'il aurait fallu traiter ailleurs avec moins de suite (1).

La méthode de visiter complétement une pièce d'Horlogerie devient un avis indirect pour le repassage et le rhabillage, et suffit à ceux dont la main-d'œuvre a toujours été supposée acquise avant de lire cet ouvrage; elle nous dispensera donc de nous occuper plus spécialement de ces deux sujets si détaillés, et qu'il suffira de citer pour avertir de ce qu'ils exigent. On a dit (197), p. 219, que cet article provient de feu M. *P. Gaudron*, très-habile artiste de son temps, et nous l'étendrons ici par quelques mots jusqu'aux pièces actuelles, tant Montres que Pendules. Le dernier article de la page 224 se termine par des observations sur l'échappement à verge, et devait être accompagné des suivants :

1459. « Il faut prendre soin, continue M. *P. Gaudron*, d'éviter les battements, renversements et accrochements de tout échappement (à verge, à cylindre, à virgule, etc., et de même dans les Pendules l'accotement de la pièce d'échappement au fond des dents par trop de force motrice), et conduire le balancier ou le pendule doucement au doigt pour juger de l'exactitude et de la liberté des effets à toutes les vibrations ou oscillations d'un tour de la roue d'échappement; le nombre de ces vibrations est le plus souvent double de celui des dents de la roue. En démontant le coq d'une Montre on remarquera si les vis fonctionnent aisément, si elles ne forcent point le coq ou ailleurs la platine, si elles ne remplissent point trop juste les noyures de leurs têtes, ce qui ne manquerait pas de forcer et déplacer le coq dans le cas où elles tourneraient mal rond, car les pas d'une vis filetée ne tournent jamais exactement rond, et peuvent gêner les parois de ses trous; les pieds du coq doivent sans brider établir seuls sa position constante, que les vis ne doivent que *presser* uniquement contre la platine; on observera de même la liberté de suspension du pendule, etc.

1460. « L'échappement, étant reconnu bien disposé, sera enlevé totalement pour faire

(1) On a vu (art. 197, ou page 219 du 1er vol.) que nous avions commencé à passer en revue, d'après *Gaudron*, tous les articles de la Montre à partir de celles à roue de rencontre jusqu'à celles pourvues d'échapp. plus parfaits, et d'un réglage plus soutenu. Cette récapitulation s'est trouvée interrompue à la page 224 du même volume par les instances de plusieurs souscripteurs, au sujet des premières notions de physique générale, qui manquent en effet au plus grand nombre des Horlogers, ou du moins à beaucoup de ceux qui en portent le nom. C'est un effet gênant de la distribution en livraison, si nécessaire à la facilité de leur acquisition, que l'on nous a généralement demandée, mais qui a interverti souvent une marche plus méthodique. Cependant nous avons eu l'attention d'indiquer, du moins par le *titre courant des pages*, le sujet qu'elles traitent, et nous espérons qu'une table générale analytique, et par ordre alphabétique, encore plus commode pour retrouver une foule de passages qui n'ont pu être mentionnés dans les *titres courants*, remédiera complétement à la division interrompue de notre travail, et rétablira ainsi la distribution de la matière.

écouler le rouage peu à peu et lentement, afin de juger si les roues tournent droit et rond et parallèlement aux platines. On observera aussi les jours du barillet en tout sens avec la platine et la fusée s'il y en a, avec la roue du centre et son pignon, etc.; la chaîne doit passer librement, du haut comme du bas, sans aucun accotement avec les parties voisines. On s'assurera plus exactement de ces conditions quand la chaîne, ou le ressort tirant sur le rouage, tendra à rapprocher le barillet de la fusée ou à les faire déverser. En cas de barillet denté, celui-ci doit de même tourner rond et droit, et ne pas être déjeté par l'appui de ses dents sur le pignon du centre, quand le ressort tout armé tire avec toute sa force; c'est le moment où l'on peut s'assurer de ses effets et de la situation droite en cage de la roue du centre, surtout avec des Montres plates, dont les pivots sont trop rapprochés, et dont les aiguilles ont si peu de jour entre elles et le cadran ou le cristal.

1461. « On aura l'attention de ne laisser aucune vis du dehors dépasser l'intérieur de la cage ou des ponts, ni pouvoir toucher à la longue par leur bout arrondi au barillet ou à d'autres pièces. Quant aux Montres à verges, quand les tiges de roue de champ ou de rencontre se croisent, elles doivent avoir un petit jour entre elles, ou avoir une petite gorge pratiquée à chacune pour en prévenir le contact. Il est assez évident que les mobiles ne doivent pas pouvoir toucher aux piliers, ponts, barrettes ou autres pièces voisines, ni au fond des creusures où elles se trouvent noyées; cela doit être essayé avec leur ébat en cage et avec sûreté relativement à l'usure progressive des trous de pivots. On sondera l'ébat latéral des pivots dans leurs trous, lequel doit être modéré en permettant la libre circulation de l'huile.

1462. « Les trous des pivots étant ébizelés par le dehors et pourvus de cônes ou réservoirs, chaque bout de pivot ne doit dépasser juste le fond de ce cône que de la quantité bien arrondie de son extrémité; il ne doit pas non plus être plus court que son trou. Avant de démonter le mouvement il faut en visiter et vérifier les reperts, tant sur l'arbre de barillet et sur la platine que sur le carré du rochet et sur une de ses dents avec le cliquet, ou en marquer de provisoires, que l'on rendra ensuite plus apparents. Il faut *surtout*, avant de lever les goupilles des piliers ou les vis des ponts, désarmer les ressorts moteurs.

1463. « Après avoir démonté et retiré au moins les pièces délicates, on observera si les piliers ne forcent point la cage ou les platines, soit lorsqu'on enfonce les goupilles avec force, soit que l'on serre les vis des piliers, quand il y a des vis; on verra si les piliers sont solidement rivés, si la contre-potence ou la barrette en place permet de régler le jeu de la roue d'échappement. Si d'autres barrettes, qui reçoivent les pivots d'une roue quelconque parallèle à la platine, lui laissent le jeu convenable, on examinera l'état du nez de potence, celui du lardon de potence en y plaçant la pièce d'échappement, dont on rebouche et replante ou change au besoin les trous suivant l'exigence des effets.

1464. « Lorsqu'on aura retiré le balancier et sa pièce d'échappement quelconque, on examinera l'état des pivots pour remédier à leur défaut de poli ou à leur usure; ce

qui peut obliger de reboucher les trous, ou de changer ceux en rubis s'ils sont trop grands. On vérifiera le petit jeu et la liberté en hauteur que doivent permettre les coquerets ou contre-plaques qui, très-rapprochés de leurs trous, doivent cependant laisser l'huile extérieure y rentrer aisément. Les pivots ayant la trempe voulue, leurs trous en rubis doivent avoir très-peu d'épaisseur ; ceux de l'échappement doivent être munis de contre-plaques avec rubis ; la face extérieure des trous doit être arrondie pour attirer au centre la dernière partie de l'huile ; celle-ci se place d'avance, en son temps, dans les trous, afin que le pivot en y entrant porte seul l'huile aux contre-plaques, opération qui est toujours au nombre des dernières.

1465. « On examinera chaque roue et sa rivure ; sa rondeur sera aussi vérifiée sur le 8 de chiffre. On verra si tous les pignons ont des tigerons suffisants, avec des portées proportionnées et assez étroites pour ne pas se coller trop fortement à l'entrée des trous ; ils ne doivent être que peu ébizelés du côté de la portée, qui doit toujours être plutôt étroite. On verra s'il y a des creusures à la face des pignons et si elles sont propres à garantir leurs ailes de l'extravasion de l'huile.

1466. « On calculera, d'après le nombre permis des tours de fusée ou du barillet denté, si la Montre peut marcher au moins 30 heures ; si la pendule peut tirer au moins 18 jours, etc. Le contraire dans la Montre peut provenir d'une chaîne trop courte, ou, dans les autres cas, d'un ressort ne faisant pas assez de tours dans son barillet ou le remplissant trop. On examinera séparément tous les engrenages, s'il n'y a pas accotement dans les entrées, ou trop d'arc-boutement, par défaut ou excès de pénétration, ou des chutes à la fin des menées. Un engrenage imparfait sous l'un de ces rapports peut, ou faire arrêter le rouage, ou occasionner des pertes de force, ou des précipitations par l'augmentation de puissance dans les glissements, ou l'usure par les chutes à la fin de la menée, ce que l'oreille aide aussi à distinguer et reconnaître par la marche de l'échappement.

1467. « Nous avons souvent recommandé l'*uniformité* de la menée : utile partout, elle est indispensable dans les engrenages des premiers mobiles, parce que la force y est plus grande pour user, les frottements plus rudes, et l'inégalité de puissance d'autant plus sensible que chaque menée plus lente y dure plus longtemps ; chaque aile du premier pignon d'une Montre est en effet menée pendant 5 à 6 minutes, suivant le nombre des ailes ; mais les engrenages des derniers mobiles ne sont pas moins susceptibles, à cause de la réduction de la force motrice qui, aisément absorbée par de moindres défauts, peut faire arrêter la pièce. Il est donc nécessaire de soigner également les uns et les autres. L'engrenage de roue de champ, quand il y en a, offre encore plus de difficultés pour que ses dents soient fendues suivant l'alignement oblique de la tige de la roue de rencontre, et avec assez de vide pour l'obliquité de sa marche, et enfin à cause de son recul plus intense et à la fois plus dur. On y obvie parfois, en partie, en plaçant la contre-potence en avant de l'axe de la roue de champ (on pourra consulter à ce sujet les précautions indiquées particulièrement pour ce cas dans notre Traité de l'engrenage, *Voy.* prem. moitié du second volume). On a l'avantage de supprimer tout à fait cette diffi-

culté, depuis l'emploi plus commun aujourd'hui d'échapp. à repos qui n'exigent que des roues plates.

1468. « La chaîne des rouages à fusée doit avoir sa longueur fixée à n'embrasser qu'environ un cinquième ou un sixième de la circonférence du barillet, par la partie appliquée dessus, après qu'elle a couvert toute la fusée jusqu'à l'arrêt de celle-ci. Plus longue, elle serait sujette à remonter sur son crochet, ce qu'il importe de vérifier et d'éviter. La chaîne doit entrer librement dans le pas de fusée et en sortir de même.

1469. « On observera aussi la règle générale que l'arbre de barillet n'ait pas trop de jeu en hauteur ni d'ébat dans ses tourillons, qui doivent être presque justes avec un léger biseau pour permettre l'entrée à l'huile; ces trous violemment pressés sont sujets à s'agrandir, s'ils ne sont pas en bon laiton bien écroui, avec tetine d'une bonne épaisseur. Les trous en pierre n'y valent rien, ni à la roue du centre; le diamètre du noyau de l'arbre doit occuper juste un tiers du diamètre intérieur du barillet bien uni et adouci partout; le ressort doit être simplement graissé d'huile et bien essuyé après, il restera toujours assez gras; il doit avoir, en l'armant, ses tours régulièrement séparés, ce que l'on peut voir avec un faux couvercle découpé à jour, pour la précaution de ne pas fatiguer le trou du fond. La hauteur du ressort doit être juste et libre, avec trois quarts et même quelquefois un tour de reste, et autant d'armure, au delà des tours nécessaires à la marche; il doit produire un tirage égal sur toute la hauteur de la fusée; au besoin on égalise celle-ci au levier par les moyens connus. Mais cet égalissage a besoin d'être vérifié de nouveau quand le ressort est rendu, après les premiers mois. C'est après cette opération que l'on établit les reperts pour la bande du ressort ou pour les roues et croix d'arrêt du barillet denté; avec ce dernier il vaut mieux employer un ressort fait comme pour fusée, mais avec le moins de diminution possible de la force du centre, pourvu que les tours se détachent suffisamment, que d'employer un ressort diminué du dehors dont les tours extérieurs se collent et restent sous l'influence de l'épaisissement de l'huile, suivant le temps écoulé et la température. Si le drageoir ne retient pas assez fortement le couvercle du barillet, on rabat avec le brunissoir le bord extérieur du drageoir, et celui intérieur du couvercle. Mais un barillet bien fait et bien écroui n'y est guère sujet. Il ne faut pas oublier la barrette, ou en faire une si elle manque. On empêche quelquefois un couvercle trop libre de tourner, au moyen d'une goupille, etc.

1470. « En remontant, on commence par placer l'huile aux trous de l'échapp., ainsi qu'au plus gros pivot de la roue du centre dans l'angle de sa portée, et non pas à son trou, dont la longue tige emporterait l'huile; ce n'est guère qu'à la fin du remontage que l'on place l'huile dans ses réservoirs extérieurs; mais tout cela ne peut avoir lieu qu'après avoir vérifié les effets de l'échapp., et à sec, comme essai, avoir placé la virole du spiral au point voulu de son repos, et déterminé sa longueur, si elle n'est pas déjà trouvée. Car ses opérations sans huile doivent avoir eu lieu avant de mettre celle-ci définitivement, pour ne la pas extravaser. Avec les échapp. à repos, le spiral a rarement besoin de changer de longueur si la pièce était réglée antérieurement. On conçoit donc qu'on ne procède au remontage qu'après toutes vérifications ou réparations faites. Un

nettoyage soigné doit se faire au moyen du savonnage, avec une brosse très-douce, ensuite en agitant les pièces dans l'eau claire pour en dissoudre le savon; puis vient l'immersion dans l'alcool (esprit-de-vin) pour absorber l'eau des pièces déjà essorées, avec l'attention de ne pas les laisser longtemps dans l'alcool pour éviter des taches que certains esprits occasionnent. Cette méthode, plus sûre, est du reste plus prompte que l'ancienne, et préférable à l'usage de la brosse à sec et avec des poudres qui altèrent le fini des pièces. La latitude de la raquette ou du cadran de rosette, dont l'engrenage de râteau et le jeu en tout sens ont été vérifiées à l'avance, doit suffire au nouveau réglage, si le spiral a été dans l'origine de force et de grandeur convenables, et s'il est bien dressé dans ses tours. Avant de remonter, on passe le *fusin à sec* dans les trous de pivots, et *un peu gras* d'huile dans les écrous des vis. Un pinceau sec et propre de blaireau, à manche de plume, peut achever d'écarter au besoin les molécules de poussière.

1471. Toutes ces précautions et cent autres que les circonstances peuvent suggérer, qu'il serait trop long de décrire, et que l'état variable et l'examen de la pièce doivent indiquer, sont à la fois un avertissement de ce qu'il faut observer dans une pièce à réparer, repasser ou visiter. Les moyens de main-d'œuvre sont tout ou partie de ceux qu'on emploierait pour le neuf, ou des modifications partielles de ces moyens, suivant le besoin. Or, c'est ce que tout artiste expérimenté, et même tout élève doué de l'habileté requise, jointe à la réflexion, doit trouver de lui-même, s'il est bien pénétré de l'exigence de son art et de tous les principes que nous avons développés dans cet ouvrage.

Ceux qui voudront réunir tout ce qui concerne l'usage civil trouveront un peu plus loin le visitage particulier des pièces à répétition, dont la *cadrature* plus ou moins compliquée exige aussi tant de soins!... Nous aurons ainsi divisé en trois parties le visitage complet, opération fort longue, afin d'éviter au lecteur l'ennui d'une nomenclature suivie trop fastidieuse par ses détails presque infinis. Nous allons passer aux échapp. libres à détente et à cercle, comme les derniers et les plus parfaits du genre actuel. Ce ne sera qu'après cet article que viendra le visitage des répétitions, toujours donné comme devant servir également au repassage et rhabillage de cette partie, ainsi que ce qui précède a été destiné à l'indiquer pour les pièces simples.

DE L'ÉCHAPPEMENT LIBRE A DÉTENTE ET A CERCLE.

1472. On a dit ci-dessus que cet échapp. est le plus généralement adopté pour les Montres marines à longitude et à suspension, comme aussi pour les chronomètres portatifs; il laisse encore plus de liberté que tout autre au balancier, dont les arcs plus étendus ont aussi une plus grande force de mouvement. Il comporte depuis 40 jusqu'à 60° du balancier pour l'action totale de menée, y compris le dégagement de la détente. En choisissant

avec discernement les matières qui entrent en contact, il peut marcher sans huile à la levée et n'en exige qu'à ses pivots. Mais quelques artistes croient devoir tenir encore la levée un peu grasse. Cet échapp. porte en Angleterre le nom d'*Arnold*, suivant l'usage de donner à diverses machines le nom de celui qui y excelle, en y portant lui-même quelques modifications heureuses. Mais il paraît certain qu'il fut publié et appliqué en France pour la première fois, et à quelques différences près, par *Pierre Le Roi* et par *F. Berthoud*, dans les essais de leurs pièces marines. A la suite de la présente construction *dite* d'*Arnold*, adoptée généralement, nous donnerons celle peu différente de *Earnschaw*, son successeur en réputation, et qui a aussi ses partisans. Les principes y sont du reste les mêmes, et les dispositions à peu près équivalentes.

1473. Les fig. 6 et 7, pl. XLII, représentent le plan et le profil de la construction *dite* d'*Arnold* antérieure à celle d'Earnschaw. La roue R de douze dents d'*Arnold* est taillée presque à l'ordinaire quant à sa division, mais elle est creusée en dessus comme une roue de champ, de manière à laisser à ses dents une épaisseur à peu près triple à leur extrémité, qui seule se trouve ainsi être formée en couronne. Le plan des dents a la figure d'une demi-dent ordinaire avec sa demi-courbe en cycloïde, ou sa demi-ogive, du côté seulement de la menée. La partie en couronne ne couvre qu'environ la moitié de la saillie des dents en dehors du limbe de la roue. Cette partie en couronne est destinée à s'accrocher sur un petit talon d'arrêt en rubis établi en *r* et adapté à la détente-ressort en acier *o o'* fixée à la platine en *o'* par sa patte avec pied et vis. Cette détente a aussi un talon d'acier qui contient la partie du rubis d'arrêt, qui y est enchâssée et collée. L'un et l'autre ont une direction un peu oblique, pour mieux retenir la dent qui s'y arrête. Le rubis dépasse en dessous la boîte de la détente pour y produire l'accrochement de la partie en couronne des dents de la roue; et comme le dégagement se fait en dedans de la roue, il faut que son limbe soit plus bas pour que le rubis n'y frotte pas; c'est ce qui nécessite la couronne de l'extrémité des dents.

Lorsque la roue pressée par le rouage tend à marcher de *o* en R, une dent *r* est retenue par le rubis d'arrêt; mais lorsque le doigt de dégagement *i*, marchant aussi de *o* en R, pousse la détente vers le centre de la roue, celle-ci devient libre, et la dent qui se trouve à portée de l'axe du balancier peut lui donner une impulsion, comme on le verra plus loin.

1474. Tout près des dents de la roue est un cercle d'acier C de même épaisseur que la roue avec son champ, et enfilé à frottement dur sur l'arbre du balancier, comme on le voit en C, fig. 7. Au-dessus de ce cercle a été placée d'avance sur le même arbre une virole d'acier *v*, aussi à frottement dur. On y pratique deux entailles du genre déjà expliqué (1451) pour la tourner à volonté à son point voulu au moyen d'une pince, etc. La virole porte en *i* un rubis un peu saillant hors de sa circonférence, appelé doigt de dégagement, pour opérer sur le petit ressort *p* de détente.

1475. Le cercle C, vu en plan fig. 6, est entaillé en *o* de la largeur des 2/3 d'un espace de dent de la roue, et porte en *l* une levée en rubis; une barrette en B, fixée à la platine par pieds et vis, a son extrémité relevée d'équerre, qui porte une vis de rappel B contre

le bout de laquelle s'appuie pendant le repos la boîte ou talon *r* de la détente-ressort dont l'élasticité presse légèrement sur le bout de la vis de rappel. Celle-ci est fixée dans sa position par une autre petite vis de pression perpendiculaire au plan, uniquement pour empêcher la vis de rappel de tourner sur elle-même par les chutes si répétées de la détente-ressort. Cette détente va en diminuant d'épaisseur vers sa patte, et c'est à peu de distance de cette patte que se trouve son épaisseur la plus réduite, au point d'y être flexible comme un ressort, ce qui lui en donne le nom. Cette partie de ressort cède facilement à l'action du doigt de dégagement, sans que le reste de la détente ait lieu de ployer.

1476. Un autre ressort plus faible *p p'*, coudé en *p'*, est rivé à la détente vers son milieu; il est plus étroit que la détente pour ne pas toucher à la vis de rappel au-dessus de laquelle il passe pour appuyer son extrémité en *p* sur le bout un peu recourbé de la détente, que ce petit ressort dépasse un peu; la partie la plus faible de ce ressort, et par laquelle seule il est flexible, se trouve près du coude de sa rivure. Toutes ces parties et leur configuration assez simple s'expliquent aisément du reste, tant par le plan que par le profil, fig. 6 et 7; nous allons considérer leurs effets dans l'action générale de l'échappement.

1477. On a supposé ci-dessus la roue en tendance au mouvement dans le sens de *l* vers R par l'action du rouage, qui n'a pas besoin d'être autrement représentée; mais cette roue est retenue en repos par sa dent en *r* accrochée sur le talon *r* en rubis de la détente-ressort. Ce talon est même un peu oblique, c'est-à-dire qu'il a un peu de pente ou de tirage dans le sens de retenir plus sûrement la dent de la roue. Lors donc que le cercle d'échappement C, fig. 6, tourne avec son balancier dans le sens de R vers *o*, le doigt de dégagement en rubis *i*, porté par la virole *v*, qui tourne aussi dans le même sens, rencontre bien l'extrémité du petit ressort *p p'* et l'écarte, comme une sorte de *pied-de-biche*, en le séparant de la détente-ressort; mais celle-ci, appuyée sur sa vis de rappel, reste immobile et continue de retenir la dent en repos de la roue : il n'y a point alors d'action dans l'échapp., c'est une vibration muette ou *coup perdu*. Mais lorsque le balancier a épuisé son mouvement, tant sur le petit ressort *pied-de-biche* que par le frottement de ses pivots et la résistance du ressort spiral armé de ce côté, etc., ce balancier revient en sens contraire de *o* vers R; alors le doigt *i* en rubis de la virole *v* rencontre le bout du petit ressort *p p'*, appuyé dans ce sens sur l'extrémité courbe de la détente-ressort, et ne pouvant céder au doigt *i* sans entraîner vers le centre de la roue cette détente qui ploie facilement près de sa patte; alors le talon en rubis de la détente dégage la partie en couronne de la dent de roue, en se portant un peu vers le centre de cette même roue, et au même moment, une autre dent, également suspendue et devenue libre, va frapper vivement la levée *l* du cercle C, laquelle se trouve à sa portée, ce qui imprime au balancier une impulsion réparatrice de la force perdue dans son mouvement précédent. Cette vibration devient celle de la véritable action de l'échappement, et n'a lieu, comme on le voit, que par une vibration sur deux; pendant cette action, le doigt *v* ou *i* a fini la sienne sur le petit ressort *p p'*, qui est revenu à sa première place, ainsi que la détente-ressort ap-

puyée de nouveau sur sa vis de rappel B, où vient à la fin de la menée se reposer une autre dent *t* de la roue. Le balancier, à sa vibration suivante, recommence à faire passer le doigt *i* sous la détente pied-de-biche, qui cède en ce sens sans effet, puisqu'elle ne fait que se détacher de la détente-ressort restée en place; mais au retour du balancier le doigt *i*, appuyant au contraire le *pied-de-biche* contre la détente-ressort, les porte toutes deux vers le centre de la roue, dégage en dedans la dent en repos sur l'arrêt de rubis, et permet à une autre dent située vis-à-vis de l'entaille du cercle d'échappement d'y engrener, et de donner au balancier une nouvelle impulsion, et ainsi des suivantes. On appelle ces échappements, ne produisant qu'une impulsion sur deux vibrations, dont une est muette, échappements *à coup perdu;* mais, relativement à la liberté et indépendance du balancier, c'est au contraire un coup de gagné, puisque le balancier reste indépendant dans toute la durée d'une vibration, sauf la seule et faible résistance du pied-de-biche, qui n'a que la force de revenir à sa place, et que, dans la vibration avec échapp., le dégagement de la détente et de la menée ne dure au plus que 60° sur environ 225° d'une demi-vibration, dont presque les 3/4 sont parcourus librement par le balancier sans aucun contact de l'échapp. Or, c'est un grand avantage pour le balancier de n'éprouver dans ses vibrations que l'influence la plus courte de l'échappement et, par suite, du rouage sur son mouvement; il serait même très-désirable sous ce rapport que l'action de levée y fût instantanée comme un coup de marteau. Mais, d'un autre côté, plus l'arc de menée est court, plus il faut de force motrice appliquée en moins de temps, et plus le balancier perd par le dégagement du repos d'autant plus résistant à la puissance acquise du balancier : on s'en est donc tenu jusqu'ici à cette construction.

1479. On observe dans cet échappement les proportions suivantes : le cercle C a pour diamètre la distance entre une dent de la roue (comptée pour une) et la 3e, c'est-à-dire prise sur les pointes de 3 dents, comme dans la mesure vulgaire du pignon de 6. La face d'arrêt du rubis placé au talon de la détente doit être inclinée dans le sens de produire un *tirage* de la dent qui la fasse rétrograder imperceptiblement lors de son dégagement, pour que le frémissement de la détente-ressort, toujours mince pour avoir peu de masse, ne puisse faciliter ce dégagement avant l'instant voulu.

1479. Le ressort pied-de-biche *p p'* doit viser à très-peu près au centre du cercle, identique avec le centre du balancier, mais de manière à être attaqué plutôt après qu'avant la ligne des centres, quand c'est pour le dégagement de la détente-ress. Il vaut mieux que ce soit dans le sens de la résistance seule du pied-de-biche dans la vibration muette, que cet effet ait lieu un peu avant le centre. La face de levée en rubis du cercle d'échapp. doit être dirigée exactement à son centre; la distance des centres de la roue et du cercle doit laisser entre lui et la pointe des deux dents voisines un petit jour égal, ce qui dépend de la mesure de la détente, de la position de son talon d'arrêt et de sa patte. Le cercle d'échappement et la virole *v* doivent être tournés de manière qu'à l'instant du repos du spiral où la dent est dégagée du talon, une autre dent en avant puisse atteindre la levée du cercle sur leur ligne des centres avec le degré de chute

nécessaire à cet effet. Quelques-uns donnent plus de chute aux chronomètres de poche qu'à ceux à suspension, exposés à moins de secousses circulaires. La détente-ressort doit être menée assez longtemps pour ne revenir sur sa vis de rappel que quand la dent menante a fait la moitié de son mouvement vers la levée, et toutefois assez vivement pour que le rubis d'arrêt reçoive la dent suivante. Les ressorts de détente et celui de *pied-de-biche* ne doivent opposer de résistance que celle nécessaire à la vitesse modérée du retour à leur place. Il faut combiner partout la légèreté avec la solidité, afin d'absorber le moins possible de la force du balancier, qui obtiendra aussi des arcs plus grands et plus libres, ce qui n'exclut pas le poids convenable du balancier.

1480. La patte en *o'* de la détente est supposée portée sur un plot de la platine, de hauteur à maintenir la détente parallèle à cette platine. L'appui de la vis de rappel et le talon de détente sont vers le quart de la longueur de cette dernière comme centre de percussion du tout, et plus propre à éviter le frémissement. La roue peut être en laiton pur, ou allié d'argent ou d'or, et marcher sans huile avec levée en rubis ; le ressort pied-de-biche peut être d'or à 18, avec doigt en rubis sans huile. On conçoit du reste qu'il faut ici tous les soins d'une exécution exacte, raisonnée dans l'esprit du sujet, sans ce luxe aux autres parties qui a fait dire aux artistes étrangers que l'on avait prodigué dans certaines pièces françaises *le temps d'en fabriquer trois pour une.* Il faut s'attacher soigneusement à l'essentiel, sans toutefois négliger le reste.

Échappement libre à détente suivant la méthode d'Earnshaw.

1481. Cet échappement, vu fig. 8 et 9, même planche, est composé sur le principe du précédent avec peu de différence dans les détails. La principale est la direction de la roue tournant en sens opposé et appuyant sur le talon de détente comme en la *refoulant* sur sa patte, au lieu que le sens d'appui d'*Arnold* tendrait à l'*allonger*, expressions qui ne servent ici qu'à spécifier chaque construction. Le dégagement de la dent se fait en éloignant la détente de la roue ; il en résulte qu'à la barrette B, la tête de vis de rappel est placée en sens inverse, sa tige traversant alors librement un trou de la détente, un peu au delà du talon, pour régler la pénétration du rubis d'arrêt dans la roue, et afin que la pente de *tirage* de ce rubis ne le fasse pas trop pénétrer sous la dent. La roue d'*Earnshaw* est plate, et ses dents, inclinées comme dans la figure, agissent par leur angle adouci sur la levée en rubis du cercle d'échappement. Cette levée, au lieu d'être dirigée au centre du cercle, est inclinée un peu plus que les dents pour n'en être atteinte que par leurs pointes et sur la ligne des centres. La détente-ressort a sa patte fixée par deux vis latérales à un piton ou plot, fixé à la platine par une vis et deux pieds ; les trous de la patte de détente sont oblongs pour tâter le rapprochement du bout de la détente vers le cercle d'échappement et établir le petit jour des dents de la roue avec le cercle, ainsi que le léger accrochement du pied-de-biche. Les deux figures 8 et 9 indiquent assez ces modifications. Quelques artistes craignent la flexion de la détente-ressort sous la pression de la roue ; d'autres y trouvent la sûreté nécessaire quand la détente ne ploie qu'en un point de peu d'étendue ; ils y trouvent moins de facilité à l'arrêt

au doigt, moins de frottement et plus de simplicité dans l'exécution, et le disent plus fréquemment employé dans les chronomètres anglais. Il paraîtrait qu'on peut l'employer aussi avantageusement que celui d'Arnold, qui semble néanmoins offrir plus de régularité mécanique. Les parties du plan, fig. 8, qui se retrouvent aisément dans le profil, fig. 9, sont assez connues par la description précédente, et dispensent celle-ci des lettres de renvoi.

1482. Dans ces deux échappements de même espèce, la détente a été nommée *détente-ressort* par *Berthoud* pour la distinguer d'une autre construction de cette pièce, appelée *détente à pivot*, parce que celle-ci n'est point diminuée en ressort et qu'au lieu de patte elle porte à son extrémité un petit arbre dont les pivots roulent, ou plutôt oscillent dans les trous de la platine et d'un pont. Un spiral de 3 à 4 tours assez forts est fixé par un bout à un piton ordinaire implanté à frottement dans la platine, et son centre est attaché par goupille à une virole à frottement sur le petit arbre de détente, comme la virole de spiral d'un balancier ordinaire. La détente à pivot ayant été moins employée, on ne connaît guère de résultats comparatifs qui puissent en décider le choix; le spiral de celle-ci, étant un ressort plus long, paraîtrait offrir une progression de résistance moins rapide; mais la détente peut opposer plus de masse, et dans ces effets si délicats appliqués à un échappement, on ne peut se déterminer que par des expériences spéciales qui ne paraissent pas jusqu'ici assez connues.

EXAMEN DE LA CADRATURE ORDINAIRE DE RÉPÉTITION.

Pour servir à son visitage et à son repassage.

1483. En complétant ici ce qui concerne les pièces à l'usage civil, nous avons à faire quelques remarques sur la cadrature de répétition; il est dangereux d'essayer la correction des défauts qu'on croit y reconnaître, avant d'avoir sur ce sujet les notions suivantes, basées sur les principes généraux de la mécanique. Cette correction exige beaucoup de réflexion et d'usage en ce genre tout particulier; une retouche mal conçue, faite à une pièce qui semble manquer dans ses fonctions, peut la rendre tout à fait défectueuse, de bonne qu'elle était, et faire manquer ainsi plusieurs autres qui y ont rapport. Si l'on continue de retoucher en conséquence à celles-ci, il n'est pas rare d'occasionner un désordre général dans l'ensemble, lorsqu'il aurait suffi souvent du resserrement ou du redressement d'une broche à vis peu solide ou trop serrée, ou de quelque autre défaut aussi facile à corriger.

Les proportions des pièces d'une cadrature ne peuvent être établies pour la première fois sur un calibre que d'après la distribution du rouage du mouvement disposé provisoirement et aussi, en conséquence, sur un calibre d'essai, et toujours assujetties du reste à un certain ordre, ne fût-ce que pour y ménager le passage libre des marteaux, et dans tous les cas pour la séparation du *petit rouage* de répétition d'avec le grand rouage du mouvement; mais on y trouve bien d'autres dépendances, et en grand nombre.

Celui qui commence à s'occuper de cette partie doit se procurer une répétition bien

faite, qu'il puisse démonter pour en tirer un calibre, afin de se pénétrer de toutes le dispositions obligées. Il pourra ensuite en tracer un autre de dimension différente au besoin. On ne peut entrer ici dans toutes les considérations que présente la matière; mais nous extrairons les observations principales qui suivent de l'ouvrage intitulé : *Essai sur les répétitions*, 1 vol. in-8° d'environ 300 pages, publié par *Creps*, bon praticien genevois, ancien ouvrier de la manufacture de Belleville, près Paris. Nous tâcherons d'éclaircir le style affecté de cet auteur, qui s'est livré à des explications au moins superflues, souvent erronées, qui ne peuvent que fausser l'esprit des élèves ; nous abrégerons autant que possible son *Catéchisme* par demandes et réponses, qui allongent une méthode pratique généralement bonne, que nous rapportons sans garantir toutefois quelques passages qui ne nous ont pas paru clairs ni démontrés, ce dont nous avertissons en son lieu.

Ce que nous allons dire à ce sujet formera suite aux articles précédents du premier volume de cet ouvrage, p. 167, avec renvois aux pl. V, VI, VII; à la cadrature de Lépine, p. 216, et ses renvois à la pl. X, même volume, et à celle de *Stagden*, p. 360, renvoyant à la pl. XIV volume *idem*.

1484. « Il faut, dit l'auteur genevois, combiner la cadrature avec le rouage, et celui-ci avec les pièces intérieures de répétition, en commençant par les marteaux, dont on fera pénétrer la course le plus en dedans possible du mouvement, sans qu'ils puissent toucher dans leur passage aux pièces qui les avoisinent, lesquelles auront été primitivement aussi distribuées dans cette intention. On marquera ensuite l'entrée ou passage du poussoir entre la roue de fusée et le barillet, où correspondra le point de midi du cadran, et aussi le milieu de la charnière du mouvement, ainsi que le talon de crémaillère sur lequel appuiera le poussoir. Ce point de la crémaillère décidera en partie de la longueur de celle-ci, et déterminera le degré de douceur du poussage ; il sera plus doux à mesure que le centre de mouvement de la crémaillère sera plus éloigné du point d'appui du poussoir ; mais le choix n'est arbitraire que jusqu'à un certain point; car, plus le poussoir est doux, plus il a besoin d'être long hors de la boîte, ce qui peut devenir défectueux. Le diamètre des poulies de la chaîne contribue aussi par sa grandeur à surmonter leur frottement par l'effet d'un plus long levier.

« La pièce des quarts, devant agir sur les deux marteaux, aura son centre de mouvement à peu près au milieu de l'espace entre leurs axes, mais un peu plus près de celui du petit marteau. Ce centre de la pièce aux quarts sera rapproché de celui de la platine autant que le passage de la chaîne et du bout *e* de la crémaillère le permettront; voy. pl. VII, fig. 4. On trace le tout-ou-rien IT en tangente ou à angle droit, à très-peu près, avec le rayon entre G et *z* de la petite poulie, ou perpendiculairement au chemin de la chaîne, et à peu près à la ligne F Q *m* de la pièce aux quarts, lorsque le bras *m* est accroché à son repos par le bec *y* du tout-ou-rien ; ce bras *m* doit être sensiblement plus long que celui courbe en *u* qui fait reculer la levée 5 du rochet. Le tout-ou-rien qui sert de pont à l'étoile en V a le centre T de son très-court mouvement porté assez loin pour que le carré de remontoir puisse passer par une ouverture circulaire au-des-

sous de T, pratiquée exprès dans la pièce du tout-ou-rien. Les centres de mouvement de la crémaillère, du carré de remontoir, du pivot de l'étoile, et même du pivot *q* du gros marteau, se trouvent à très-peu près sur une même ligne. Ces positions principales, étant fixées et arrêtées, règlent celles de la plupart des autres pièces qui ont avec celles-ci un rapport direct, tels que les ressorts qui peuvent être plus ou moins longs suivant la place, pourvu que leur épaisseur de lame soit proportionnée à sa longueur. Le limaçon des quarts est porté forcément par la chaussée des minutes, celui des heures a son étoile à portée du bouton de surprise; le sautoir de l'étoile est placé en conséquence.

« Après ces premières pièces tracées sur le calibre et celles de détail qui leur correspondent, on s'occupe de la bâte ou cercle qui forme la cage de la cadrature, dont la hauteur est déterminée en partie par celle de la lunette, ainsi que par celle totale de la boîte. On proportionne à cette hauteur celle de la pièce de cadrature la plus élevée, si le cadran est plat, suivant toujours la dimension générale de la boîte, du mouvement, etc. La bâte a en dessous un *drageoir* où la platine entre jusqu'au tiers de sa propre épaisseur; on pratique aussi quelquefois en dessus de la bâte un autre drageoir qui reçoit les bords d'un cadran plat. La bâte est ensuite vidée; son point de *repère* se trouve fixé par son entrée qui reçoit la *charnière*. Du milieu de celle-ci on divise en 4 parties le cercle de bâte, ce qui sert à rectifier le *limaçon des quarts*. On conserve parfois une partie du fond à enlever, afin d'en réserver un bras pour un pied du cadran, et un autre pour recevoir la vis du cadran, selon les dispositions du calibre de cadrature, et l'on enlève le reste du fond en laissant assez de matière solide autour de la charnière. La bâte est retenue par 3 *vis-clefs* placées triangulairement ou à peu près, suivant la place des autres pièces; la place des vis-clefs est fraisée sur la platine pour leurs portées, de manière que celles-ci serrent sur la platine en même temps que leurs têtes serrent la bâte, dont l'épaisseur est creusée par une fraise pour les recevoir; chaque vis-clef doit avoir son repère.

« Le *rochet*, roue d'acier qui fait frapper les heures, est vérifié par le cadraturier pour la justesse de ses dents, exactement au nombre de 12 dans sa seule moitié dentée; ce nombre manque parfois. Les pointes des dents du rochet doivent être arrondies, trempées, revenues au rouge et polies.

« Les marteaux sont tenus aussi longs et pesants que le permet leur passage sans accottement entre les mobiles; leur forme en devient très-irrégulière et chantournée sur le plan et l'élévation; leur partie plus saillante au dehors, qui est celle de leur contact avec la boîte ou avec le *timbre*, doit être la plus forte en masse; si cette partie est étroite et raccourcie, quoique plus pesante que le reste, les coups en seront peu distincts. (Ceci n'est pas assez développé.) Des deux *chevilles des marteaux*, la position de celles 3 et 4 est la plus importante; et, comme il reste peu de place en cet endroit du marteau, on met la cheville de levée le plus en dedans et le plus près possible du centre de mouvement du marteau, afin que, quand il lève, le passage sur cette cheville ne vienne pas trop au bord de la platine et ne l'ouvre pas, comme on en voit beaucoup qui sont ensuite gênées par la bâte, ou dont le passage vient rencontrer celui de la levée des heures et percer

dedans, ce qui affaiblit la platine. Quant à la cheville pour le ressort, si on pouvait la placer aussi près de l'arbre du marteau que celle de levée, ce ressort ferait moins de chemin et les coups en seraient plus forts et plus nets, sa force étant tenue alors un peu plus puissante: on la placera donc aussi près de l'arbre de marteau que le permettra la levée, et autant vers le dehors du bord extérieur que le passage de *fermeture* le comportera. Lorsque la cheville du ressort est trop en dedans, elle oblige celui-ci à se courber davantage, ce qui gêne son effet. On établit donc de suite les ressorts des deux marteaux; ils exigent de l'attention pour proportionner leur résistance à être levés à ce qui reste de la force motrice du petit rouage, car il y a la résistance de 8 ressorts à surmonter; les plus forts sont: 1° et 2° les deux des marteaux; 3° celui de la pièce des quarts, qui doit aussi surmonter les deux petits ressorts de levées; 4° celui de la levée intérieure des heures; 5° celui du tout-ou-rien, et enfin 6° celui du sautoir de l'*étoile*. On emploie l'acier d'Angleterre pour ces ressorts, qui ont alors autant de force qu'avec un tiers de plus d'autre acier. Le plus de hauteur de lame produit aussi le plus d'élasticité. La lame doit être diminuée en fouet sur son épaisseur pour agir par toute sa longueur, et avoir sa tête solidement arrêtée. La forme à choisir est celle qui fait glisser le moins le point d'action ou d'appui des ressorts en décomposant moins la force. Les ressorts de marteau des pièces à timbre se font plus faibles, car un coup trop fort sur un timbre en arrête les vibrations. La patte des ressorts se fixe sur la platine avec une vis et un pied le plus éloigné possible de la vis. La lame doit laisser un jour avec la platine et avoir ses angles de dessous arrondis. Les ressorts, rougis également de couleur *cerise demi-mûre*, se trempent dans l'huile. Le degré de *revenu* de l'acier anglais doit passer le bleu vif et être bien égal partout; il peut alors être limé, car ils doivent être plus massifs qu'ils ne doivent rester, afin qu'ils ne soient pas brûlés au feu; on les réduit à la lime après le revenu; quand ils sont déjetés à la trempe, on les redresse en frappant obliquement le bord que l'on veut allonger avec un marteau demi-tranchant; mais, pour ôter de la bande, on prend un marteau rond, et la lame, portant partout sur un tas de plomb, est frappée peu à peu sur le côté convexe. Pour qu'ils ne reprennent pas leur forme après la lime, ce qui arriverait nécessairement, on leur donne, étant limés, un deuxième revenu un peu moins fort que le premier en les contenant dans leur correction, et on les laisse complétement refroidir étant toujours contenus. »

1485. La *sourdine* est une pièce d'acier plate et mince marquée 7 et 8, pl. VII, fig. 4, placée près du bord de la platine, à gauche de la figure, et pouvant osciller quelque peu sur son centre établi par une vis à portée, noyée, et à tête large; ses extrémités en 2 et 4 reçoivent au besoin les coups des chevilles de ressort des marteaux, en empêchant ceux-ci d'arriver sur la boîte ou sur le timbre. Le bras 8 doi être prolongé au delà de ce qu'on voit dans la figure, et en dehors de la cheville 4, quoiqu'il soit interrompu vers 8 par erreur de gravure. Ces extrémités amincies passent sous les levées sans y toucher. La sourdine porte de plus, vers la moitié de la distance de 8 à 7, un bras saillant de côté, omis dans la gravure, et qui traverse une encoche

de la bâte pour atteindre un bouton mobile porté par la *lunette* du cristal et retenu par un ressort plat fixé par une vis à l'intérieur de cette lunette, dont le ressort laisse rentrer le bouton. En appuyant fermement le doigt sur le bouton saillant au dehors de la boîte, il repousse la sourdine, et celle-ci les marteaux, dont les coups sont sentis alors par le doigt seul et sans bruit : l'action de la sourdine ne doit faire reculer les marteaux que d'un quart de leur chute, et le recul de la sourdine peut être borné dans cet effet par la tête 7 du ressort du petit marteau. Il est plus sûr de n'appuyer le doigt sur la sourdine qu'après que le poussoir a décroché le tout-ou-rien.

La toque des pièces à timbre, qui n'est pas indiquée ici pour ne pas compliquer la figure, et parce qu'elle est moins importante, est une sorte de ressort courbe porté intérieurement par la gorge de la boîte, dont une ouverture oblongue est traversée par un doigt qui sert à faire glisser cette pièce à droite ou à gauche ; elle se termine par deux parties passant au-dessus du timbre et plus saillantes en dedans, où elles reçoivent dans l'une des deux positions les coups des marteaux avant qu'ils n'arrivent au timbre ; ou bien qui, étant glissées en sens inverse, se trouvent dégagées des marteaux pour laisser sonner le timbre : il en résulte un coup de marteau sec, comme dans les pièces à *tac*, mais toujours moins net que quand les marteaux frappent sur des plots larges soudés à la boîte comme dans les pièces à *tac* et sans timbre de *Julien L. R.*

1486. On voit dans la même fig. 4 celle de la crémaillère que nous avons déjà décrite aux articles du premier vol. cités plus haut, en y détaillant ses effets. Plus la petite poulie du rochet sera réduite en diamètre, moins elle exigera de chemin pour le poussoir et pour la crémaillère ; mais l'effet de celle-ci en sera d'autant plus dur ; il y faut donc un moyen terme. A 12 heures, le bout de la chaîne doit tirer en tangente sur la cheville qui l'attache à la petite poulie. Quant à la crémaillère *y* C *t b* i C *e*, elle doit être large, et arrondie autant que possible dans ses angles rentrants, pour résister à la forte action du poussoir. Nous en avons assez parlé ailleurs. (V. les art. cités plus haut.)

1487. « On fait les levées 14 et *q* avant la pièce des quarts, et pour cela on trace une ligne droite du centre de ces deux pièces jusqu'au centre de chaque marteau ; on donne aux levées la forme indiquée dans la fig., celle d'une forte demi-dent à ogive très-allongée, et dont le côté droit et la pointe sont sur leur ligne des centres ; on donne à la grande levée des heures *q* la même longueur qu'à la levée mobile intérieure *m*, fig. 1, pl. VII. Celle du petit marteau doit être un peu plus courte.

« Le premier soin pour la pièce des quarts est qu'elle soit libre et sans ballottage sur sa tige fixée bien droite et ferme sur la platine, à laquelle le plan de cette pièce doit être parfaitement parallèle. Le canon d'acier du centre de la pièce aux quarts y est monté à vis avec portée. La tige peut s'élever à la hauteur de la bâte, pourvu qu'elle ne touche pas tout à fait au cadran. La pièce aux quarts étant ébauchée, et son canon terminé, elle sera placée sur sa tige et approchée de ses levées, sur lesquelles elle doit enjamber suffisamment pour leur menée ; ce petit marteau devra être levé à moitié avant le grand. Pour connaître la hauteur de la première dent de la pièce aux

quarts, on fait reculer celle-ci et sa levée jusqu'à ce que le marteau soit au fond de sa course en arrière; c'est ce qui détermine la quantité d'engrenage, ou de pénétration ou enjambement, et le point de la première ligne des centres à tracer sur la pièce aux quarts. Alors, ayant taillé la première dent et fait échapper sa levée, on tire sur la pièce aux quarts une nouvelle ligne des centres pour la seconde dent, et de même pour la troisième, et cela pour chaque marteau. On égalise la distance des dents avec un outil appelé *échantillon*. Lorsque la troisième dent du grand marteau a frappé, sa levée doit s'appliquer tellement à la pièce aux quarts, que ces deux parties réunies ne paraissent en faire qu'une. Au delà du bout de la pièce aux quarts, côté du grand marteau, se trouve le bras u cintré et destiné à faire rétrograder la levée intérieure des heures, et à la maintenir hors de prise tant que la pièce aux quarts n'est pas tombée, et jusqu'à ce que l'autre bras d'accrochement *m*, un peu plus long que le précédent, soit dégagé de la pointe y' du tout-ou-rien. Ces deux bras font partie du même morceau d'acier qui forme la pièce aux quarts. Le bras aussi du même morceau de la pièce aux quarts, et qui tombe sur son limaçon au centre de la platine, doit décrire intérieurement un arc de cercle ayant pour centre celui X, et aboutissant au centre de la chaussée. Il reste à faire à la pièce aux quarts l'entaille A G, nécessaire au passage du canon du *doigt de rappel* K, et à placer la cheville que ce doigt est chargé de ramener. La position de cette cheville est très-importante, et, quand elle n'est pas bien située, elle occasionne l'hésitation si fréquente du coup du troisième quart. L'auteur que nous suivons prétend que cette cheville doit être sous la deuxième dent, pour être *autant* éloignée du centre du doigt de rappel, lorsque la pièce aux quarts est sur le degré le plus profond de son limaçon, *que quand* la pièce aux quarts a terminé sa course et est arrivée à son repos. Celle de *Berthoud* est sous la troisième dent, mais peut-être avec moins d'avantage, car elle fait perdre de la puissance au doigt de rappel dont le levier s'affaiblit au moment où la force motrice diminue le plus. La première de ces méthodes serait donc préférable. La cheville X opposée, du ressort D X, doit être posée sur le même principe. Le doigt de rappel doit être ajusté très-exactement sur le carré de l'arbre du rochet au-dessus de la petite poulie : on laisse d'abord à ce doigt assez de matière pour le tailler de manière qu'après la dernière heure frappée il y ait un petit intervalle de plus entre celle-ci et le premier coup des trois quarts, et qu'aussi aux douze heures, où le doigt recule le plus, il n'arrive pas à toucher en arrière la cheville. C'est ce que doit faciliter la division du rochet, qui ne porte ses 12 dents que sur une moitié de sa circonférence. Il y a des cadratures où, en place de la cheville, la pièce aux quarts porte un crochet mobile ayant par l'arrière un petit ressort qui règle son degré de course, et où s'engage la pointe courbée du doigt de rappel, auquel le crochet obéit, ce qui facilite et adoucit l'effet, en supprimant le frottement de la cheville et en cédant au besoin à l'arrière du doigt, si celui-ci recule au point d'y toucher ; cette disposition, qui facilite le troisième quart, exige aussi plus de soins et de travail que la simple cheville, mais elle est préférable, quoique moins usitée. »

1488. Nous avons expliqué, dans notre premier volume, les effets du tout-ou-rien, soit

dans le texte, soit par les planches, ainsi que ceux de l'étoile, du limaçon des heures, de la surprise du limaçon des quarts, etc., et nous devons renvoyer à ces mots de la table générale, où le numéro des articles sera indiqué.

1489. Des contre-ressorts particuliers reçoivent aussi assez ordinairement les coups des chevilles de marteau très-peu avant que les marteaux n'atteignent, soit la boîte à *tac*, soit le timbre, soit les ressorts-timbres plus en usage aujourd'hui. Ces contre-ressorts doivent être solidement serrés et avoir leurs vis de rappel assez fermes, ou dures à tourner, pour que les coups des marteaux ne les fassent pas céder à la longue en se dévissant. Dans la pl. VII, fig. 4, les contre-ressorts se trouvent remplacés par la sourdine, qui en produit l'effet si elle est ajustée avec une vis de rappel qui l'empêche de céder trop aux coups des marteaux; mais des contre-ressorts à chaque marteau valent mieux.

« Chaque pièce doit être trempée séparément, après avoir eu sa face dressée sur une glace avec de la pierre à l'huile broyée. Celles qui agissent avec plus d'effort, comme les levées, doivent rester plus dures et n'être *revenues* que jaunes, en supposant des essais préalables suffisants pour leur forme définitive, à laquelle il n'y ait plus à limer. La pièce aux quarts est revenue rouge seulement à ses dents et bleue au centre; il en est de même du tout-ou-rien et du sautoir, c'est-à-dire aux parties agissantes mises d'avance à leur vrai point; quand elles sont trop dures pour être limées, on les use avec de la pierre à l'huile et une lime de fer recuit. Les deux limaçons sont revenus violet; la surprise, bleu; la crémaillère, les poulies et les marteaux, bleu; le grand ressort de pièce aux quarts, bleu-gris. Pour tremper on chauffe toutes les parties également, jusqu'à la couleur dite *cerise demi-mûre;* au delà, l'acier anglais se brûle, et même, par plusieurs trempes, il redevient fer. On trempe dans l'huile d'olive toutes les pièces qui ont à exercer leur élasticité, et dans l'eau pure et froide toutes les autres. »

1490. Quant aux roues de minuterie, l'auteur donne à celle des heures la grandeur du limaçon des quarts. Le diamètre de celle de renvoi dépend de la grosseur du pignon de chaussée, qui est ordinairement semblable en diamètre et en nombre à celui intérieur du centre. Du reste, ces grandeurs dépendent de la place que peut occuper la tige sur laquelle doit rouler la roue de renvoi, comme la tige 12, fig. 4, pl. VII. Du reste, les distances des centres étant une fois déterminées, nous avons assez dit les mesures à prendre pour les deux engrenages de cette partie, dans nos longs articles sur cette matière, où nous avons remarqué que les praticiens y trouvaient une *difficulté* qui, avec les principes sûrs que nous avons donnés, cesse aisément d'en être une.

1491. On fait aussi frapper le demi-quart aux répétitions par une pièce particulière à sautoir, superposée à la pièce des quarts et centrée sur le même canon; cette pièce porte une seule dent répondant à la 3e du petit marteau, c'est-à-dire à celle qui est le plus intérieure qu'elle couvre exactement, sauf qu'elle est une idée plus courte. Son sautoir lui permet aussi de s'écarter de dessus cette 3e dent pour en former une 4e. C'est même sa position habituelle, au moyen d'une des pièces de la cadrature qui la repousse toujours en dehors comme 4e dent, lorsque la pièce aux quarts revient à son

accrochement de repos. Le limaçon des quarts est aussi doublé, et les quatre entailles du limaçon supérieur correspondent au milieu des vides de celui de dessous, ce qui forme 8 divisions ou degrés au lieu de 4. Lorsque le limaçon supérieur présente au bras de la pièce aux quarts son vide, qui commence à moitié du degré du limaçon de dessous, la pièce du demi-quart qui a un bras pareil, couvrant celui ordinaire qu'elle dépasse, alors son bout, trouvant sa place dans le vide du limaçon supérieur, à la hauteur duquel il se trouve, reste en place comme 4e dent, et celui des 3 quarts, qui frappe le dernier, est suivi d'un coup du petit marteau qui y ajoute le demi-quart ; mais, quand les degrés des deux limaçons se trouvent de même hauteur, comme il arrive toujours pendant la première moitié d'un quart du limaçon inférieur, le bras de la pièce de demi-quart, dépassant toujours le bras inférieur, tombe sur une partie pleine du limaçon supérieur, et la force du coup l'oblige à rentrer en faisant céder son sautoir : alors la 4e dent, se trouvant reportée sur la 3e et *passant avec elle* dans le 3e quart, il n'y a point de demi-quart. Il faudrait une figure pour en prendre une idée plus complète ; mais, comme il y en a de diverses constructions qu'il serait trop long d'expliquer, il vaut mieux s'en procurer la vue sur une des plus récentes.

1492. Dans la cadrature de *Lépine*, qui n'a qu'un marteau frappant deux coups plus précipités pour chaque quart, l'effet du demi-quart y devient beaucoup plus simple et dépend uniquement de la division du rochet des quarts et de celle de leur limaçon restant simple, mais divisé en 8 degrés. Cette cadrature permet avec la même simplicité la division de l'heure de 5 en 5 minutes par la répétition ; alors les doubles coups des quarts y valent 10 minutes, et leur coup simple, 5 minutes ; la partie du rochet destinée aux quarts et leur limaçon y étant tout aussi simplement divisés en conséquence.

1493. Il y a tant de conditions à remplir dans la cadrature de répétition, que le plus court est, comme nous l'avons dit, d'en consulter et imiter une bien faite. Quant aux amateurs, ils pourront, comme nous l'avons dit aussi ailleurs, se faire lever par un horloger le cadran de leur répétition, et y faire remettre les aiguilles pour y considérer ces effets à loisir en faisant agir le poussoir.

1494. Nous ne porterons pas plus loin ces observations principales sur les répétitions, quoique l'auteur ait traité ce sujet beaucoup plus longuement dans un amphigouri souvent peu intelligible. Il y traite de l'emboîtage et du visitage, et finit par une récapitulation de tous les défauts qui peuvent arrêter ou faire manquer les effets d'une répétition ; le nombre de ces articles de défauts y monte à plus d'un cent, et il peut encore s'en rencontrer bien d'autres.

1495. Cependant, quoique bien persuadé par l'expérience qu'un artiste intelligent et exercé peut, avec des connaissances mécaniques naturelles, ou plus ou moins acquises, corriger les défauts des répétitions, nous croyons devoir, pour d'autres, exposer encore ici la récapitulation de la partie la plus ordinaire des difficultés qu'ils y peuvent rencontrer. Nous continuerons donc à la prendre dans *Crespe*, en l'abrégeant autant que possible.

Examen des causes d'arrêt les plus communes dans les répétitions.

1496. « Quand une répétition manque en quelqu'un de ses effets, il faut naturellement en chercher d'abord la cause dans les pièces qui coopèrent immédiatement à l'effet défectueux. Mais on doit avant tout examiner si le ressort de petit rouage est trop faible ou se développe mal, s'il est gêné en hauteur, s'il bride par le crochet de l'arbre, si le noyau a juste le tiers du vide, si le bout du ressort gêne dans l'ouverture du barillet, ou si ce bout, ressortant du barillet, frotte au lardon de potence, défauts que l'on rencontre assez souvent. Si trop de jeu dans les trous de pivot des marteaux, ou leurs ressorts agissant trop loin du centre, ne font pas déverser ces marteaux et toucher à des roues ou à la platine; ou encore par l'effet des levées des quarts; si les chevilles des marteaux frottent dans les ouvertures de la platine, ce qui arrive parfois après la dorure; si les tiges vis-à-vis des marteaux sont relâchées; s'il y a défaut de liberté à la levée intérieure des heures, ou trop de jeu au canon de cette levée, ce qui peut faire changer son engrenage avec les dents du rochet et les faire arc-bouter; si cette levée arc-boute entre la tête et le bras de la pièce aux quarts, cas où il faut souvent la refaire (ceci demanderait plus d'explication); si la pointe de dent mal arrondie reste accrochée sur les dents du rochet; si le marteau en frappant fait retomber la levée sur la dent suivante, ce qui ne doit pas avoir lieu; si ce marteau descend trop, il faut voir si la levée touche au timbre, à la bâte ou à la calotte; si la sourdine s'élève sous la levée des quarts et fait gêner celle-ci contre la pièce aux quarts, soit lorsqu'elle tombe, soit à son retour; si la sourdine fait trop reculer les marteaux, qui restent alors arc-boutés sur l'extrémité des dents; si la petite poulie ou sa cheville de chaîne frotte à la platine, si le dessus de cette cheville touche au dessous de la pièce aux quarts. Si la gorge des poulies n'est pas propre, l'huile et les matières qu'elle y attire peuvent faire mécompter les heures; si la grande poulie a son axe incliné, elle peut frotter à la platine. Il faut voir si l'anneau final qui attache la chaîne à la crémaillère ou le bout de celle-ci buttent contre la grande poulie, ce qui gêne souvent le dernier coup des quarts. La chaîne trop courte ou trop longue peut aussi faire mécompter; auquel cas on en refait le dernier anneau; on peut aussi raccourcir le bras de crémaillère, quand la chaîne est trop longue, mais de peu et avec précaution, en s'assurant de l'identité de son effet sur les autres heures; il faut alors être certain que le poussoir puisse pénétrer plus avant sans inconvénient. Si la chaîne n'est pas souple ni l'anneau libre, le dernier quart peut en être gêné ou arrêté. La crémaillère mal contenue sur la platine peut s'élever ou s'accrocher à la bâte ou à la charnière; poussée trop fort, elle peut passer au-dessous du limaçon ou au-dessus, en s'engageant entre lui et l'étoile, ce qui peut arriver si le bout du bras de crémaillère est coupé en talus, tandis qu'il doit être coupé carrément ou à l'équerre.

« La pièce aux quarts, n'étant pas libre sur sa broche, peut la desserrer et s'accrocher aux pièces voisines. La tige ou broche, mal vissée et inclinant sur un des marteaux, retiendra la levée accrochée, ou le marteau levant trop arrêtera quelques mobiles inté-

rieurs, ou restera arrêté sur la dent de levée. Cette même tige, inclinée vers le limaçon des quarts, fera passer son bras de touche au-dessous, ou, dans le cas contraire, au-dessus; ce qui fera mécompter ces quarts. Il faut examiner si le ressort de la pièce aux quarts est trop fort ou appuie sur cette pièce, le dernier quart en devient pénible; si la petite poulie s'élève insensiblement, comme elle tend à le faire, elle peut aussi frotter au dessous de la pièce aux quarts. Il faut examiner si le canon de la levée intérieure n'est pas ramené avec difficulté, et surtout si la cheville à ramener de la pièce aux quarts n'est pas mal placée; si le doigt de rappel est mal formé et perd trop de sa puissance.

« On ne doit guère toucher aux levées que pour les refaire, et ce sont des pièces difficiles. Le ressort à double effet de levée manque souvent par quelque défaut (*comme la plupart des pièces qui en remplacent plusieurs*). Si le ressort de grande levée ne peut pas la ramener lorsqu'elle rétrograde trop, ou que le bras s'écarte trop, une goupille à platine peut parfois en borner le recul, mais le bras de la pièce aux quarts aura besoin d'être raccourci, en ne laissant que le libre passage du rochet. Mais, avant de rien raccourcir ou altérer, on doit s'assurer positivement qu'il n'y a pas d'autre remède ou d'autres causes.

« Il faut voir si le tout-ou-rien n'a pas assez d'écart, ou s'il a trop d'accrochement; il doit dégager la pièce aux quarts un peu avant que le poussoir soit à fond ; celui-ci même doit faire lever à moitié la dent suivante du rochet, sans la faire échapper. L'accrochement du tout-ou-rien doit être tracé de son centre de mouvement et avoir un peu de *tirage*, c'est-à-dire produire un léger recul de la pièce aux quarts dans son dégagement.

« Si l'étoile portée par le tout-ou-rien n'est pas libre, le sautoir ne la renvoie pas au delà, et l'un de ses rayons peut butter contre le bouton de surprise, de même si le sautoir est roidi sur sa broche et n'a pas sa liberté; s'il en a trop, il glisse en dessus ou en dessous de l'étoile et en gêne l'effet; si l'étoile peut s'élever par trop de jeu en hauteur, elle accrochera la surprise, et le bouton de celle-ci pourra butter contre le limaçon des heures. Si le plus haut degré du limaçon passe trop près de l'arbre de fusée, quand celle-ci se remonte du côté du cadran, il peut y être arrêté par l'agrandissement du trou de fusée, que l'on rebouchera, à moins qu'on ne lève une gorge à l'endroit voulu de l'arbre de fusée.

« Si la crémaillère fait détendre sur midi, avant d'avoir atteint le limaçon, c'est souvent parce que trop d'ébat en hauteur la fait accrocher sur la portée du dessous de l'étoile qui la tient éloignée de son limaçon, dont cette portée ne devrait pas dépasser le degré le plus profond ; ou bien cette portée devrait être en pente douce, pour que le bras de crémaillère ne puisse qu'y glisser, au cas qu'il s'élève trop. Il ne faut pas changer la longueur du bras de crémaillère sans être bien certain qu'il en est besoin. Le mécompte vient souvent d'un degré de limaçon inexact. Si l'on *démonte* celui-ci d'avec son étoile, il faut avant *le repérer*, pour ne pas le replacer en sens contraire, ce qui peut changer l'effet des degrés par défaut primitif de juste centration.

« Vers 55 minutes, lorsque la surprise est en train de mener l'étoile, si les degrés

du limaçon ne sont pas bien concentriques, ils peuvent donner une heure de plus ou de moins, et de même si un degré n'a pas l'étendue juste d'un 12e de son cercle, ou si le degré est trop en avant ou trop en arrière. Plusieurs pièces de fabrique ont l'un de ces défauts. La chaîne peut aussi s'allonger par l'usage et donner une heure de moins; alors l'anneau où le dernier maillon sont à refaire un peu plus courts, mais de très-peu, ce qui vaut mieux que de raccourcir le bras de crémaillère.

« Il faut aussi, au moment *critique* du changement d'heure, voir si la surprise bien libre reçoit en plein le bras tombant de crémaillère, mais pas avant l'effet du sautoir des heures. Le cercle extérieur du bras de crémaillère doit avoir sa partie extérieure de cercle tracée du centre de mouvement de cette même pièce et partageant le centre de chaussée et du limaçon des quarts. Quand le degré du limaçon des heures ne se trouve pas bien placé, on peut parfois déjeter de côté le bras de crémaillère en le frappant en dessous sur un bord avec le marteau tranchant, mais il faut en rajuster la longueur et le plan droit, et éviter que l'heure ne soit changée avant les 60 minutes et qu'elle le soit très-peu après, épreuve fort délicate. Il vaudrait mieux, dans ce cas, faire rétrograder le limaçon par le sautoir; mais, dans ces retouches dangereuses, il faut, comme nous l'avons déjà dit, s'assurer avant qu'elles ne feront pas manquer d'autres effets, etc.

« Si la goutte de la surprise se relâche, cette dernière peut accrocher l'étoile. Si la tige du centre a trop de jeu en cage, on peut, en appuyant avec la clef sur la chaussée, faire serrer la goutte de sorte que la surprise en soit gênée, ce qui fera mécompter les trois quarts. Le passage du bouton de surprise trop gros peut se gêner dans les rayons de l'étoile; si ce bouton est trop petit, l'étoile sera vacillante et ne mènera pas la surprise assez loin. La cheville qui règle le va-et-vient de la surprise peut aussi dépasser celle-ci en dessous, frotter à l'étoile, et la faire avancer d'un degré.

« Si le limaçon des quarts touche au canon du pignon de renvoi de minuterie, il vaut mieux diminuer l'épaisseur de celui-ci ou le déplacer un peu, que de toucher au limaçon. Si le défaut provient du ressort de pièce aux quarts qui ne la fait pas bien tomber, il faut affaiblir et adoucir le bout du ressort qui presse sur la cheville, et donner de la bande au ressort près du pied avec le marteau tranchant. (Ceci ne nous paraît ni clair ni assez développé.)

« La boîte de la Montre influe aussi parfois sur les effets de cadrature, et souvent par le seul finissage de la boîte: le canon du pendant peut gêner la retraite de la crémaillère et rendre difficile la sonnerie du 3e quart, ce que l'on connaît lorsque le 3e quart arrêté ne sonne qu'en faisant sortir le mouvement de sa boîte. Un coup donné à la boîte la fausse souvent en cet endroit, et suffit à produire ce défaut.

« Si la longue tige du centre est faussée ou tourne mal rond, elle peut faire manquer une partie des effets des quarts, de la surprise et du changement de l'étoile. Il convient aussi de s'assurer des effets de minuterie, et du nombre de ses roues, parfois fautif; on refait alors la roue qui a un faux nombre. Celui des dents du rochet de répétition peut aussi manquer, soit par la dernière dent cassée, soit par erreur de di-

vision dans l'origine. Le poussoir ou le talon de crémaillère touche quelquefois au fond de l'ouverture de la platine ou à la roue de fusée ou au barillet, ce qui empêche le dégagement du tout-ou-rien ; ou aux dents de la roue du centre, qui peuvent en être faussées et produire un arrêt dans le rouage.

« Lorsque le propriétaire d'une répétition veut toucher aux aiguilles avant que les quarts n'aient cessé de sonner, ce qu'il ne doit pas faire, il peut éprouver à 60' une résistance dont il ne tient pas compte, et, entre autres accidents majeurs, il peut au moins faire tourner le limaçon des quarts faiblement rivé sur la chaussée : alors les quarts ne répondent plus aux divisions du cadran. Le remède de remettre le limaçon à sa place et d'en resserrer la rivure est facile, mais il faut avertir les propriétaires d'éviter cet accident.

« Le ressort, moteur d'un petit rouage de répétition, ayant à opérer tant d'effets malgré les diverses résistances dont nous avons énuméré ci-devant la plupart, doit avoir encore le pouvoir de faire sonner les 12 heures 3 quarts lorsque l'on maintient la pièce droite par la bélière située en bas, c'est-à-dire les platines étant verticales, et la boîte droite en hauteur, dont le poids doit être surmonté par le mouvement du petit rouage ; c'est une des épreuves auxquelles on soumet généralement les répétitions pour s'assurer que le ressort de petit rouage ne manque pas de force, et dans la supposition que tous les effets se font d'ailleurs librement. »

1497. L'auteur s'étend encore dans d'assez longues redites sur diverses autres difficultés, mais qui sont de nature à pouvoir être appréciées par de bons observateurs ; les autres, comme nous l'avons dit, ne doivent guère se hasarder à les surmonter ; nous croyons donc devoir nous en rapporter sur le reste à ceux qui en ont une suffisante pratique.

Ce long article prouve d'ailleurs à combien d'inconvénients sont sujettes les Montres à répétition, ce dont les observateurs instruits sont si pénétrés, que l'on n'emploie plus aujourd'hui, soit pour les chronomètres, soit pour les régulateurs fixes, et pour tout ce qu'on nomme *garde-temps*, que des mouvements simples, dans lesquels on ne permet ni sonnerie, ni répétition, ni même de quantième, et que l'on réduit aux seules fonctions de la mesure du temps par heures, minutes et secondes.

1498. La différence de sûreté dans les effets, entre ceux du mouvement réglant d'une pièce quelconque d'Horlogerie et ceux de la répétition, nous paraît provenir principalement de leurs différents moyens d'action. Un mouvement simple ou *garde-temps*, mesureur du temps, n'est composé que de roues qui peuvent aisément tourner parfaitement rond, sont soutenues le plus librement possible aux extrémités de leur axe par des pivots très-fins constamment lubrifiés par l'huile des réservoirs, et ayant infiniment peu de frottement. Des engrenages passablement établis, car il n'y en a guère de parfaits, sauf ceux que l'on exécuterait suivant nos principes développés précédemment, ce qui sera toujours trop rare, ces engrenages médiocres, disons-nous, ne mèneront pas uniformément, il est vrai, mais à cela près ils ne produiront pas de causes d'arrêt. L'échappement est composé de mobiles qui roulent de même sur des pivots encore plus fins,

parfaitement tournés et polis, et la plupart du temps dans des trous en rubis. L'action circulaire de tous ces mobiles se fait donc avec la plus grande liberté; la force motrice peut y être puissante, le nombre voulu de révolutions ne peut y éprouver d'erreur; si l'échappement est bon et exécuté solidement, la pièce pourra, par quelque légère imperfection, ne pas régler très-exactement, mais elle ne s'arrêtera pas, elle ne manquera pas directement aux effets attendus, surtout quand il ne s'agit de la mesure du temps que pour l'usage civil. Dans une cadrature, au contraire, des pièces de formes très-variées se meuvent sur des broches d'un fort diamètre comparativement aux pivots d'un rouage, il y faut une extrême justesse, point d'huile, ou très-peu, et s'épaississant d'autant plus vite. Les effets mutuels des pièces les unes sur les autres ont lieu par des leviers dont la puissance se décompose pendant la durée d'action ; il faut que les points de contact ne soient point sujets à s'user, et la dureté qu'ils exigent ne permet pas d'en différencier la matière : c'est toujours action d'acier contre acier : il y a beaucoup de frottement. La force motrice principale y est très-faible ; elle doit vaincre plusieurs ressorts en action les uns contre les autres et subordonnés entre eux ; le grippement des points de matière semblable y est très-fréquent, en sorte que, s'il est assez rare de voir une cadrature fonctionner parfaitement juste, il l'est encore plus de la voir fonctionner ainsi très-longtemps ; or il suffit que ses fonctions s'altèrent pour arrêter ou faire manquer le mouvement le plus parfait, par la correspondance obligée de plusieurs de ses parties avec celles de la cadrature.

Une cadrature qu'on laisse longtemps sans la faire fonctionner finit aussi par se rouiller dans les trous de ses broches, etc., etc. C'est pourquoi l'on doit penser qu'il faut éviter le *machinisme* en Horlogerie, et qu'on ne saurait trop la réduire à des éléments simples, directs, d'une exécution facile, et chargés de fonctions assurées par leur nature peu compliquée. Il y a bien assez d'autres difficultés à surmonter.

Il résulte néanmoins de ces remarques, principalement faites sur les Montres à répétition bien plus que sur les Pendules à tirage, deux vérités : 1° Que l'on ne peut s'occuper avec succès de cette partie et entreprendre d'y porter remède au besoin qu'en s'appuyant sur les premiers principes bien conçus de la mécanique et sur ses lois, dont la connaissance est trop rare parmi un si grand nombre d'horlogers, tandis que leur profession exige pourtant l'application la plus rigoureuse et la plus délicate de ces mêmes principes que plusieurs n'ont ni l'occasion d'étudier ni le goût d'acquérir. Il faudrait connaître au moins ce que nous avons entrepris d'en exposer dans le cours de cet ouvrage (art. 820 et suiv.). Il y a donc danger pour les ignorants (et aussi pour les bonnes répétitions qui tombent entre leurs mains) d'entreprendre sans cette connaissance les réparations d'une cadrature de répétition, comme nous l'avons déjà fait entendre ; 2° l'autre vérité est que la cadrature d'une Montre à répétition, étant la partie la plus compliquée d'une pièce d'Horlogerie de ce genre et aussi la plus facile à altérer par des retouches inconsidérées, est le mécanisme le plus sujet à manquer naturellement dans ses effets, et à faire arrêter le mouvement le mieux établi comme moyen principal de la mesure du temps, pour peu que la cadrature ne soit pas remontée avec des soins minutieux et parfaitement en-

tendus, ou qu'elle se soit altérée par l'usage, par accident, ou enfin par de mauvaises réparations.

Il est pourtant, dira-t-on, quelques horlogers praticiens de talent et qui réussissent dans diverses parties, quoiqu'ils n'aient point approfondi ces connaissances recommandées, ni consulté de livres : cela est vrai, bien que rare ; mais c'est parce que l'expérience réfléchie en tout genre, chez des hommes naturellement intelligents et très-attentifs, ne fût-ce qu'à copier d'excellents modèles, est déjà un commencement d'étude mécanique. Or c'est le partage d'un trop petit nombre, et ils ne seront pas encore sûrs de ne pas commettre d'erreurs dans les cas inusités pour eux. Mais nous avons déjà relevé ces vérités ailleurs.

1499. Plusieurs artistes intelligents, pénétrés du désavantage de cette partie si compliquée d'une Montre à répétition qu'on appelle *cadrature*, et doués de quelque talent d'invention, ont essayé de substituer à la construction habituelle des dispositions beaucoup plus simples et plus ou moins ingénieuses, mais qui, ou moins sûres dans leurs effets, ou moins exactes, ou moins commodes pour l'usage, n'ont pas continué d'être employées et sont même presque oubliées. La seule que nous nous permettrons de citer, comme la plus simple et la plus sûre que nous ayons connue, est dite de *répétition au tact*, publiée par feu *Abraham Breguet*.

1500. Le fond de la boîte de la Montre porte ici en dehors une sorte d'aiguille plate, mobile au doigt, mais s'arrêtant au point de ce fond correspondant à celui que l'aiguille ordinaire d'heures occupe sur son cadran. Onze boutons au pourtour de la boîte, dont le pendant représente la douzième heure du cadran, servent à compter *au tact* comme à la vue les heures représentées par les boutons, à partir du pendant de la boîte. Cette idée a dû résulter naturellement de la construction de nos premières grosses Montres. On sait qu'elles n'avaient qu'une aiguille d'heures avec des cadrans de cuivre doré et guillochés ou ciselés avec les heures peintes sur douze petits émaux très-bombés et à cartouches ; on voit encore à quelques anciennes pendules de ce temps des heures semblables relevées en bosse. Il y avait de plus à ces cadrans de grosses Montres, au milieu de l'intervalle des heures, douze petits boutons, que la pointe de l'aiguille, assez saillante, n'atteignait pas tout à fait, et qui indiquaient les demi-heures ; ces Montres n'avaient point d'aiguille de minute. Il en résultait qu'en ouvrant la lunette d'une telle Montre on pouvait, dans l'obscurité, tâter au doigt la position de l'aiguille en comptant les saillies du cadran, à partir du pendant de la boîte, et que l'on pouvait savoir ainsi dans la nuit l'heure que l'aiguille indiquait. Cette première idée, anciennement connue, réduit sans doute de beaucoup le mérite de l'imitation moderne qui paraît en avoir été faite : aussi n'est-ce pas ce dont il s'agit ici, mais de l'usage qu'on en peut tirer. En fait d'invention, la priorité est souvent douteuse (quoiqu'elle ne puisse l'être ici). D'une part, plusieurs esprits peuvent avoir conçu la même idée ; d'autre part, un artiste qui serait connu pour avoir d'abord acheté les inventions des autres, en les produisant en son nom, ou pour s'en être approprié souvent d'autres qui ne lui auraient pas appartenu, laisserait aisément dans l'incertitude sur celles qui pourraient réellement lui appartenir. Nous

parlons ici généralement sans prétendre approfondir la question, ni faire aucune application *personnelle*. La première idée dont il s'agit est assez antique pour n'en laisser la priorité à personne de nos jours. Quoi qu'il en soit, la connaissance de l'heure par le tact est une idée répandue depuis longtemps et tombée dans le domaine public, une idée que chacun peut exploiter et améliorer. La première construction moderne en fut défectueuse ; la suivante, meilleure, fut encore compliquée et dispendieuse ; mais il semble facile d'en reproduire l'effet à moins de frais. Nous allons essayer d'en donner un premier aperçu.

Répétition AU TACT *sans cadrature ni petit rouage.*

1501. La fig. 3, pl. XLIII, est celle d'une Montre ordinaire de forme dite *à collier*, ou*demi-collier*. Vue par le fond et en dehors de la boîte, la circonférence extérieure ou le collier porte, au milieu de l'épaisseur de la boîte, onze boutons ronds et saillants, et, entre chacun d'eux, douze petites lignes triangulaires à bords aigus et moins saillants; le pendant forme le douzième bouton. Ces saillies correspondent exactement aux heures et demi-heures du cadran, vues au travers du cristal. Une aiguille extérieure en or ou argent, large, mince et plate, centrée librement sur le fond de la boîte par un tourillon d'un fort diamètre, étend sa pointe jusqu'au delà de la baguette ronde et circulaire séparant la cuvette de la boîte d'avec la partie dite *collier*, qui porte les boutons ci-dessus. La pointe de cette aiguille mobile enveloppe et embrasse la baguette ronde de manière à ne pouvoir être accrochée par les vêtements, mais avec assez de liberté pour que la plus légère impulsion du doigt puisse faire glisser cette aiguille à droite ou à gauche. Maintenant, si on trouve le moyen de faire arrêter en un sens l'aiguille extérieure sur la division du collier qui correspond à la situation de l'aiguille des heures sur le cadran, il sera facile de connaître l'heure et les fractions d'heure où l'aiguille du cadran est placée, en poussant l'aiguille extérieure de la boîte jusqu'à ce qu'elle s'y arrête et en comptant, par les boutons, sa distance du point de midi ou du pendant de la Montre. Or cet effet devient simple et facile par un léger changement dans la minuterie des aiguilles, qui n'a aucune importance pour ce qu'on nomme le *mouvement* ou pour la mesure exacte du temps. Au lieu de la chaussée ordinaire de 12 ailes et de sa roue de renvoi de 36 dents portant un pignon de 8 qui mène la roue du canon ou d'heure de 32 dents, il suffit d'y pratiquer la minuterie usitée dans les Pendules ordinaires d'appartement où la chaussée porte une roue d'environ 30 dents, engrenant avec une roue de renvoi de même nombre et ayant à son centre un pignon de renvoi de 6 menant une roue de canon de 72 dents, ce qui exige toujours douze tours de la chaussée ou de l'aiguille de minutes pour en produire un de la roue des heures; mais il vaudra mieux que le pignon de renvoi soit de 8, avec ses ailes allongées en ogive, pour mener plus uniformément une roue d'heure de 96. On peut voir la figure et les dimensions de ce pignon menant, relatives à sa roue, dans la fig. 4, pl. XXXIV de nos engrenages. En donnant aux roues de chaussée et de renvoi une même grandeur, sous le cadran, mais telle que l'axe de la roue de renvoi réponde au vide du mouvement entre le barillet et la

fusée, s'il s'agit d'un ancien calibre à cage, on obtiendra l'effet voulu. D'autres dispositions analogues peuvent aussi être aisément pratiquées avec le calibre *Lépine*. Or, en cas de cage ancienne, l'axe de rapport traversant la cage, et portant du côté de la petite platine un 2e pignon de renvoi de 8 ailes, mènera une seconde roue d'heure de 96 dents, pleine et placée du côté du fond de la boîte, où cette roue d'heure tournera librement sur une tige fixée sur un pont de la petite platine, et centre juste à l'égard du fond de la boîte; cette dernière roue d'heure marchera avec la même vitesse que celle d'heure du cadran, mais à gauche, si l'on regarde l'aiguille mobile extérieure, qui marchera aussi dans le même sens. Enfin, cette seconde roue d'heure aura sur sa face une rainure creuse, dirigée comme un rayon, pour accrocher, dans le seul sens de gauche, un bras à pied de biche ou cliquet à ressort, porté en dedans par le tourillon de l'aiguille mobile de tact. Le simple appui du doigt conduisant à gauche l'aiguille de tact, elle pourra s'arrêter au même point correspondant que l'aiguille des heures du cadran, et fera reconnaître l'heure en comptant à gauche les boutons du pourtour de la boîte, à partir du pendant. Cette disposition, d'une exécution aisée, est plus longue à décrire que difficile à comprendre, et l'habitude en facilitera promptement l'usage.

La même fig. 3 indique aussi des chiffres gravés en dehors sur la cuvette, dont la vue dans le jour peut rappeler le sens de gauche, suivant lequel il faut compter les boutons. Cette marche à gauche n'est adoptée ici que pour éviter un mobile de minuterie, car on pourrait, avec une roue et son pignon de plus, faire marcher et arrêter l'aiguille de tact à droite, dans le sens ordinaire d'un cadran, en disposant le reste en conséquence.

L'arrêt de l'aiguille de tact au milieu de l'espace qui sépare un bouton rond d'avec le signe de la demi-heure (formé entre deux boutons par une ligne triangulaire moins saillante, mais aiguë, dirigée sur le collier dans le sens de l'épaisseur de la boîte), indiquera de même 1 quart ou 3 quarts, à cinq minutes près tout au plus, tandis que la répétition ordinaire à quarts laisse jusqu'à 14 minutes d'incertitude.

Si, dans les mouvements en cage, une partie du balancier et de son coq couvre le centre de la petite platine, comme il arrive d'ordinaire, il est aisé d'échancrer un peu le coq, afin qu'un petit pont ou barrette d'acier puisse s'étendre au-dessus du balancier, avec même jour et même épaisseur que le coq, pour porter juste au centre du fond de la boîte (condition principale) l'axe ou tige de la 2e roue d'heure ; on peut aussi substituer à notre coq ordinaire celui dit *à l'anglaise*, plus étroit et pouvant même porter la susdite tige du centre.

Avec le calibre *Lépine*, sa tige ordinaire de chaussée peut porter du côté de la cuvette ouverte à cet effet un pignon comme de chaussée, rapporté et menant une roue de renvoi dont le pignon conduira la seconde roue d'heure ; mais alors la marche de l'aiguille de tact sera à gauche. Le carré de l'aiguille des heures pour remettre la minute, faisant partie du pignon du milieu rapporté et dépassant la seconde roue d'heure, servirait à l'ordinaire pour la clef, etc.

Dans cette sorte de répétition au tact, si l'aiguille extérieure se trouve gênée par le

frottement de vêtements serrés, la 2e roue d'heure n'en marchera pas moins librement en devançant l'aiguille du tact et en faisant céder en ce sens le pied de biche, ce qui n'aura aucune influence sur la marche du mouvement. On peut donc appliquer cette construction, ou autre analogue, même à un chronomètre de poche. L'usage d'un cordon ou mieux d'une chaîne autour du cou, en prévenant les accidents, permettra de porter la Montre à l'usage civil dans la poche du gilet, et d'y consulter *discrètement* cette répétition avec l'extrémité du doigt.

1502. On y avait employé, dans l'origine, un calibre particulier avec barillet au centre ; mais la présente construction s'appliquerait aux calibres ordinaires et à moins de frais. On a aussi essayé de placer l'aiguille de tact sur la lunette pleine d'une Montre à savonnette avec une seule aiguille d'heure sur son cadran ; celle-ci arrêtait seule le pied de biche, ce qui était très-simple; mais, les boîtes à savonnette s'ouvrant à ressort, par une pompe du pendant, il fallait à l'ouverture et à la charnière une liberté qui laissait trop d'accès à la poussière. D'ailleurs cette construction sans minutes ne permet pas aux propriétaires de juger exactement de la marche de la pièce ; la disposition proposée ici conserve le cristal et surtout l'aiguille de minutes dont elle indique toujours à l'œil la précision.

Cette construction si simplifiée pourrait faire disparaître en grande partie les répétitions à cadrature, à petit rouage, à marteaux, timbres ou avec ces *ressorts-timbres* inventés depuis plus d'un siècle en Allemagne ou en Suisse, sauf toutefois le besoin des personnes infirmes privées du tact. On peut même ménager ici l'épaisseur, avec peu de différence d'avec les pièces trop plates, suivant le goût irréfléchi actuel, qui heureusement ne durera pas. Quant à la complication actuelle des répétitions ordinaires, il est à remarquer que s'il y a plusieurs artistes bien en état d'y porter les soins scrupuleux qu'elles exigent, il en est peu qui en aient la patience ou le temps, et que souvent bien d'autres ne sont pas en état de s'en acquitter convenablement (1).

1503. Le goût vicieux de la complication des effets avait été naguère jusqu'à des répétitions qui sonnaient même la minute. Il y fallait une sorte de double pièce des quarts

(1) On a déjà observé que les Montres modernes à une seule aiguille d'heure n'étaient qu'une imitation des premières grosses Montres d'Allemagne, qui ne marquaient point de minutes. Cette copie, renouvelée naguère, a passé pour une invention française ; ce n'était qu'une subtilité propre à faire supposer plus de régularité ; car la lenteur de l'aiguille et la grosseur des chiffres les font trouver presque d'accord en apparence avec toutes les Horloges, malgré la différence sensible en minutes de celles-ci entre elles. Les vrais artistes ont dédaigné ce charlatanisme, et reconnaissent, en outre, que plusieurs défauts y sont inhérents à une mauvaise composition. Ayant été un jour engagé par l'auteur de ces pièces à tâcher de les corriger, et lui objectant l'énumération de leurs défauts, il nous échappa de lui dire en définitive : « Je ne conçois pas comment vous avez pu établir des pièces semblables !... » L'auteur, un peu surpris de la *confidence*, et ne sachant que répondre : « Oh ! bien, dans ce temps-là, dit-il, je n'en savais pas davantage !... » Il faut convenir qu'en effet il a mieux réussi plus tard en faisant copier avec soin les bons ouvrages de ses prédécesseurs et de quelques contemporains, copies qu'il dissimulait sous une forme extérieure plus agréable ; mais quant aux ouvrages dont la composition plus hasardée que bien raisonnée peut lui être attribuée personnellement, ils ont prouvé aux artistes instruits de l'Europe que, depuis ses pièces à une aiguille, l'auteur n'avait guère fait plus de progrès réels dans les vrais et solides principes de son art.

à 4 parties divisées chacune en 14 degrés; mais leurs effets manquaient presque toujours. Ces complications ont été rejetées par les esprits solides, ainsi que les quantièmes multipliés, les révolutions astronomiques, etc., surtout en petit volume. Nous l'avons dit ailleurs : « Un bon almanach est plus sûr et plus économique. » On sait que plus un mécanisme est compliqué, plus il a de chances de défauts et d'erreurs. On peut néanmoins construire exprès une Montre avec un quantième solide et simple; mais il faut le faire sauter à plusieurs mois, pour leurs différences de 28, 29, 30 ou 31 jours, à moins d'une roue annuelle et de tous ses accessoires. La méthode de faire arrêter le quantième sur un zéro à la fin du mois ne résolvait nullement la difficulté, car l'époque trop aisément oubliée exigeait toujours de consulter un *almanach* (1).

1504. Nous avons eu occasion de mentionner dans le cours de cet ouvrage quelques inventions contemporaines essayées par leurs auteurs dans un but de perfectionnement; mais, tout en usant d'expressions encourageantes, nous ne les avons publiées que comme exemple des tentatives que le sujet comporte, et nullement comme une perfection absolue actuelle du genre. Aussi avons-nous donné textuellement ces articles communiqués, précédés et suivis de *guillemets*, comme citations, sans garantie de notre part, pour ne point établir ici de comparaison désagréable entre des contemporains. Si l'impartialité de l'historien nous permettait de les mettre sous les yeux des lecteurs, elle ne nous autoriserait pas à porter un jugement définitif sur des auteurs encore existants; ce droit n'appartient qu'à la postérité, et après une longue expérience, seule vraie *pierre de touche* de la valeur des productions et d'une réputation justement méritée. Si les vrais artistes doivent être modestes et sans intrigue, ceux qui ont quelque talent ont du moins naturellement droit à se faire connaître; mais, dans tous les cas, ils doivent être principalement guidés par le goût et le sentiment de leur art, comme par une instruction raisonnée et appuyée de la connaissance exacte du passé et de leur propre expérience. Les établissements anciens de cette espèce, et chez lesquels nous reconnaissons ces qualités, tels que ceux des *Julien Leroy* et de *Pierre Leroy*, son fils ; des *Ferdinand Berthoud*, des *Lepaute*, des *Lépine*, des *Robin*, etc., ont prospéré, et presque tous se sont soutenus

(1) On a vu de ces ouvrages compliqués et d'un haut prix, que nous venons de citer, tellement surchargés d'effets, que leur dimension incommode, tant en épaisseur qu'en diamètre, ne dispensait pas du besoin d'en renouveler trop fréquemment les huiles, vu que la partie réglante était trop faible pour conduire le tout. Dans celles de moindres dimensions, l'inconvénient était encore pire. Un célèbre diplomate, M. le prince de T..., si connu par ses épigrammes, disait d'une de celles-ci : « Les Montres de B... sont charmantes : elles marquent tout ce que l'on peut désirer, *excepté l'heure qu'il est.* » Le prince était alors fort mécontent d'une pareille pièce de haut prix qui manquait ses effets, Nous avons eu nous-mêmes occasion de démonter, pour en dessiner le calibre, une de ces Montres compliquées, parfaitement exécutée par les premières mains de l'Europe, que l'auteur prenait soin d'avoir à sa disposition, pièce à deux cadrans, dessus et dessous, d'une énorme dimension, peu portative, et dont la surcharge vicieuse ne lui permettait pas de marcher plus de six mois sans avoir besoin d'un nettoyage complet. Elle appartenait à l'un des protecteurs puissants de l'artiste, celui qui en avait créé la réputation et la fortune, et l'on peut dire que l'auteur n'avait rien épargné dans son ouvrage, hors les principes de proportion obligés au moins dans les compositions de ce genre. Nous nous proposions d'en donner la gravure curieuse, mais nous nous en sommes abstenu, comme d'un mauvais exemple.

longtemps, même après le décès des chefs de ces *écoles* justement estimées ; et tout en recueillant un honnête et discret bénéfice d'une profession qui n'enrichit guère que les jongleurs du genre, ces habiles artistes ont rendu service au public, aux sciences, aux amateurs instruits, et ont mérité leur renommée même de leur vivant. Ceux qui, au contraire, n'ont su que capter adroitement l'opinion des classes riches par des subtilités séduisantes, où ils ont sacrifié les bons principes à des agréments de fantaisie, n'ont obtenu qu'une vogue passagère et n'ont laissé, en définitive, qu'un pernicieux exemple et *une mauvaise école*. Ils ne sont plus vantés que par ceux qui n'ont pas la connaissance technique et intime du sujet.

1505. Au nombre des tentatives modernes plus ou moins importantes, mais ayant pour but l'utilité ou la solidité, nous continuerons à en citer quelques autres, telles que, d'abord, la suppression proposée des moyens actuels connus sous le nom d'*arrêt de remontage* (ceux-ci ont été suffisamment détaillés et figurés dans notre 1er vol., § 176 à 182, et ailleurs) ; ceux à engrenage avec double épaisseur sont les plus sujets à manquer, d'une exécution difficile, et empiètent sur la hauteur du barillet plus que la croix de Malte, qui est généralement un peu plus solide ; d'ailleurs, dans tous, la vis qui retient la roue d'arrêt n'a presque jamais assez de filets dans le fond trop mince du barillet. Or ces mêmes arrêts, plus ou moins fragiles, sont souvent supprimés entièrement par quelques Horlogers, pour éviter la dépense de temps dans une réparation minutieuse exigeant la précision et trop faiblement rétribuée ; ils ne laissent alors d'autre arrêt que le tirage direct du ressort sur la barrette, ou, faute de celle-ci, sur le simple crochet de virole, et, à la longue, l'œil du ressort n'y résiste pas et se rompt. M. *Boussard*, actuellement à *Toulouse*, remplace ces divers arrêts par une barrette allongée intérieurement sur la droite de la fig. 5, pl. XLIII, avec une sorte de queue diminuant d'épaisseur pour que son extrémité fasse ressort; elle porte de plus un tenon rond ou cheville rivée, trempée et revenue avec la barrette, et qui traverse, vers *a*, l'œil du ressort ainsi que la virole dont cette cheville affleure le dehors, en remplaçant ainsi le crochet supprimé de la virole. Cette même fig. 5 représente donc ce barillet (ordinaire du reste) vu par le côté du couvercle qui n'est échancré ici que pour laisser voir la place et l'étendue sur la droite de la nouvelle barette ; car d'ordinaire le couvercle reste plein et n'a d'entailles que celle du tenon de barrette et celle qui sert à le soulever. Le ressort désarmé ici a ses tours appuyés contre la virole. Les deux premiers cercles tracés à l'intérieur de la denture figurent d'abord l'épaisseur de la virole ; le 3e cercle est supposé représenter seul le 1er tour de lame. L'intervalle blanc qui suit est la place ou la figure de la nouvelle barrette prolongée sur la droite, sauf que cette queue à droite est plus amincie du bout que ne l'indique le blanc réservé ; ce prolongement de la barrette sur la droite occupe environ un demi-tour, et, en cédant, il adoucit le tirage sur l'œil du ressort ; alors, n'y ayant plus d'arrêt en hauteur, on en profite pour tenir le barillet un peu plus haut, ainsi que le ressort moteur ; l'œil du ressort, formé d'un trou rond de moindre diamètre, reste aussi plus solide. Ici le tenon de barrette dans le fond du barillet est supprimé, vu la difficulté de le faire entrer, en même temps que la cheville de l'œil, dans leurs places respectives.

L'auteur propose cette amélioration, comme une première idée, pour appeler l'attention des artistes sur ce sujet. Nous nous permettrons donc d'y adjoindre un léger changement, comme de laisser à la virole son crochet ordinaire, mais fait en acier et d'autant moins gros, et de pratiquer à la nouvelle barrette sans cheville les deux tenons ordinaires pour le fond comme pour le couvercle, mais placés à demi-ligne du crochet de virole, du côté de la queue de la barrette. Nous n'émettons cette idée que comme une variante du genre suggérée par la première idée de l'auteur, laquelle n'en a pas moins son mérite, et nous lui en soumettons le jugement, comme aux artistes qui voudront répondre à son premier appel ; il ne nous paraît nullement à négliger (1).

« Le même auteur peut être cité pour avoir imaginé, il y a déjà longtemps, le premier *aplomb* des Pendules d'appartement, mécanisme qui leur permet de rester *justes d'échappement* lorsqu'elles ont été transposées sur un plan moins horizontal que celui sur lequel elles ont été primitivement réglées ; sa méthode a été remplacée depuis

(1) Cette question du barillet des Montres nous rappelle la disposition présentée par M. *Redier*, dont la description est consignée aux 44e et 45e volumes des *Bulletins de la Société d'Encouragement*, et que nous allons tâcher d'expliquer ici en peu de mots.

Un barillet de la grandeur ordinaire, en acier, porte une denture taillée en rochet. Ce barillet et cette denture appuient à frottement gras sur la platine au moyen d'un cercle tenu par quatre vis, et qui remplit les fonctions de chapeau dans les Montres ordinaires. Au centre de ce barillet s'élève une broche qui devient l'arbre de barillet. Sur cet arbre pivote une roue de barillet portant à son centre une assiette qui est la bonde où s'accrochera l'œil intérieur du ressort ; l'œil extérieur s'accrochera au barillet d'acier ajusté dans la platine.

L'arbre de barillet est terminé par un carré où s'ajuste le doigt d'arrêt ; la croix de Malte se fixe sur la roue de barillet. Enfin, le carré de remontoir fait partie d'un petit rochet engrenant avec le rochet du barillet d'acier.

On comprend donc cette disposition : le ressort se développe par le centre, pendant la marche de la Montre, et qu'il se remontera par l'intérieur ; ce qui n'amène aucun résultat différent sur le barillet ordinaire.

Les avantages qui en résultent sont : 1° plus grande hauteur du ressort ; 2° longueur du carré de remontoir ; 3° assiette plus solide du barillet ; 4° d'avoir une vis de croix de Malte d'une longueur différente.

Ces avantages sont balancés par un peu plus de complication, et surtout par la difficulté qu'éprouve l'ancien outillage des Horlogers à creuser économiquement un barillet en acier.

Il a été fait, à Paris et en Suisse, quelques Montres seulement d'après ce système ; elles ont donné la preuve que ce barillet remplissait le but de son auteur.

Il n'a manqué au succès de cette invention que ce qui manque à beaucoup d'autres : la mise en exploitation par l'inventeur lui-même.

Les horlogers de province sont surtout exposés à cette cause de mort de leur invention, si nous pouvons parler ainsi ; ils ont très-peu de ressources pour mettre à profit des idées souvent fort bonnes. Si, à l'heure qu'il est, il n'est plus question de l'arrêt de M. *Boussard*, ni du barillet de M. *Redier*, ni du correcteur de la force motrice de M. *Pescheloche d'Épernay*, ni de tant d'autres inventions modernes, les inventeurs auraient tort d'accuser l'indifférence de leurs confrères ou des fabricants mieux placés, et même le mérite de l'idée. L'inventeur seul peut tirer parti de son invention, surtout en fait d'Horlogerie ; lui seul peut y avoir foi. A moins que l'innovation n'éveille à un haut degré les sentiments de l'amour-propre et de l'intérêt, on n'accepte pas avec l'enthousiasme qui réalise les inventions d'autrui.

par d'autres procédés plus simples et parfois moins assurés. C'est ici l'histoire de la filiation des idées; mais celle du premier auteur nous paraît porter le cachet d'une pensée primitive en ce qu'elle atteint directement la difficulté dans son essence. La fig. 1, pl. XLIV, représente en profil l'espèce de cage particulière du poids, ou *aplomb mobile* A de M. *Boussard*, suspendu par deux pivots en *a b* sur la même ligne que l'axe de la roue d'échappement. Ces pivots sont soutenus par un double pont extérieur pointillé vers *a b*. La même cage mobile, avec son poids A, porte en dedans et plus haut l'axe de la pièce d'échappement, et en dehors la suspension quelconque du pendule non représentée, mais qui doit correspondre à la fourchette ordinaire *c c*. B est le profil de la petite platine; celle-ci est vue de face, fig. 2, où A est la figure du poids demi-circulaire, *a* la place des pivots de cette sorte de cage et du double pont, *b* le pivot de l'axe d'échappement, etc. Il résulte de cette disposition, facile à concevoir, qu'au moyen du poids particulier A, le point *b*, fig. 2, et la suspension sont transportés autour de la roue d'échappement précisément de la quantité dont la ligne primitive d'aplomb a pu être déplacée par le défaut d'horizontalité provenant de la nouvelle place de la Pendule. Une forte vis *d*, à portée, sur la petite platine, et assez longue de tige non filetée, traverse librement une mortaise longitudinale du bas de la masse A pour en limiter le déplacement. » Ce moyen mécanique pourrait aussi s'appliquer à d'autres cas.

1506. « La fig. 3 *bis*, pl. XLIII, est un moyen du même auteur pour prolonger au delà même de l'espace d'un mois la marche d'une Pendule presque ordinaire d'appartement. La sonnerie est à râteau, et, en place du chaperon (supprimé dans ce cas), l'axe de la roue intérieure du chaperon remonte le ressort d'un barillet extérieur A de peu de hauteur, dont la denture agit sur le pignon B du centre, en sorte que le fort ressort de Montre qu'il contient est remonté en 24 heures par la sonnerie, de toute la quantité dont il s'est détendu par la marche du mouvement. C'est une sorte de remontoir doux et dont la fréquence du remontage tend à conserver l'élasticité du ressort de mouvement et l'égalité du tirage. L'absence du gros barillet de mouvement permet plus de diamètre à celui de sonnerie resté seul et pouvant contenir un ressort approprié, c'est-à-dire plus long. Le rouage de mouvement ne diffère de l'ordinaire que par un large pont intérieur qui reçoit les pivots de ses derniers mobiles, au lieu d'avoir leurs trous dans la grande platine. Quant à la cadrature de sonnerie à râteau, son limaçon a ses degrés séparés par des saillies inclinées, qui ne permettent aux aiguilles que de rétrograder pour les mettre à l'heure. Il y a aussi un petit rochet fixé sur la longue tige des minutes avec encliquetage sous la roue de chaussée. En *e* est le doigt ordinaire ou palette remontant le râteau *c* retenu alors par la détente *f*, et *d* est l'autre bras de ce râteau à branche contournée, lequel bras s'appuie sur le limaçon des heures. » Nous n'entrons pas ici dans plus de détails, suppléés aisément par les vrais artistes, et qui ne seraient nécessaires qu'à ceux qui font métier de s'emparer des inventions d'autrui. Les idées de M. *Boussard* nous semblent annoncer un talent de recherches utiles et de combinaisons ingénieuses en conservant les bons principes, qualités trop rares à une époque où l'on n'introduit de variété apparente dans les ouvrages civils que par avidité, ou pour solliciter le débit de

produits à bas prix et d'autant plus négligés. Ces citations pourront au moins assigner une époque aux idées de l'inventeur.

1507. Nous ajouterons encore à ces articles une suspension de Pendule par M. *Vallet*, déjà cité ailleurs honorablement, laquelle nous paraît réunir avec simplicité plusieurs conditions essentielles du genre, autant que l'usage civil le comporte, c'est-à-dire sans beaucoup de frais.

La pl. XLIII, fig. 6, en donne un profil suffisant pour le sujet. « Le coq C supporte par sa traverse horizontale du haut une longue tige A qui y roule à frottement par le bas, sans monter ni descendre, vu son assemblage par le moyen d'une portée et de deux chevilles frottant dans une gorge de la tige ; celle-ci est maintenue librement du haut par un collet quelconque de la boîte. Au-dessous de la gorge, la même tige se prolonge en vis qui ne pouvant changer de hauteur, comme certaines vis sans fin, oblige la mâchoire supérieure des ressorts de suspension, filetée en écrou, à monter ou descendre pour régler le pendule, les ressorts et leur centre d'action restant pincés par une mâchoire particulière *d* fixée à la hauteur du centre d'échappement. Une aiguille, fixée au bouton du haut, indique sur un petit cadran horizontal l'espace parcouru pour le réglage. Si on veut que ce petit cadran d'avance et retard soit sur le devant de la boîte, il est facile de couder la direction de la tige A au moyen d'un double genou. Les 2 ressorts descendant de B traversent la pièce horizontale *d* fendue à cet effet et fixée au coq, ayant sa face de dessous à la hauteur constante de l'axe d'échappement, ce qui est la première des conditions principales d'une bonne suspension. La mâchoire supérieure B des ressorts porte en dessous deux chevilles passant librement la traverse *d*, ou centre de suspension, pour maintenir leur parallélisme ; mais nous devons observer, comme erreur de gravure, que les lames doivent se trouver à la place des chevilles, c'est-à-dire aux extrémités des mâchoires, et que, par suite, les chevilles doivent être en dedans et très-voisines des ressorts, suivant l'intention de l'auteur d'éloigner ces ressorts l'un de l'autre autant que l'espace de la boîte le permet, et que, par suite, on doit allonger la mâchoire inférieure *e* autant que celle B. Cet éloignement est la seconde condition d'une bonne construction. Chaque ressort est retenu dans les deux mâchoires par une goupille d'acier à chaque bout, ce qui en permet librement l'aplomb voulu par le tirage de la lentille ; cette liberté des ressorts est encore une troisième condition voulue pour que les lames ne fassent pas *clinquant*, c'est-à-dire ne fassent pas *gondoler* le plan d'oscillation de la lentille. Le pendule porte sa *passe* ordinaire dans la fourchette, et en haut son double crochet *f* sur la cheville traversant et dépassant la mâchoire inférieure. La vis du bas de la tige A doit tourner rond et être assez juste dans l'écrou de la mâchoire supérieure pour en déterminer l'horizontalité, de laquelle dépend celle de la mâchoire du bas ; les ressorts prenant librement leur aplomb sont percés exactement ensemble pour avoir entre leurs trous la même distance, etc. »

Ces dispositions bien entendues suffisent à l'usage civil, qui n'exige pas tant de conditions rigoureuses que les pièces d'observation, dont il ne s'agit point ici, dit judicieusement l'auteur, qui nous paraît avoir atteint son but.

Ceux qui s'occupent exclusivement d'ouvrages à l'usage civil, et qui n'y portent que la routine ordinaire, ne connaissant pas d'ailleurs toutes les conditions de l'Horlogerie de précision, essayent mal à propos d'atteindre en partie les améliorations qu'ils ambitionnent de porter dans les ouvrages communs. C'est pourquoi, par opposition avec la suspension que nous venons de décrire, aussi bien conçue que son application le permet, nous citerons ici, comme expérience, le fait suivant :

1508. Ayant acquis à Paris, pour la province, une Pendule de cheminée d'une qualité médiocre, mais qui nous resta parce que le demandeur trouva peu après ce qu'il désirait dans son pays, nous l'employâmes pour le simple usage de famille. Nous avions voulu néanmoins y faire remplacer une suspension ordinaire en soie avec pendule léger par une suspension à ressort avec forte lentille et verge simple en acier ; n'ayant pas le temps de le faire nous-même, la construction en fut simplement indiquée à l'Horloger qui l'avait vendue. Celui-ci chargea de l'exécution un ouvrier honnête, laborieux et plein de bonne volonté, qui, flatté de travailler pour nous, y porta tous ses soins, sans réussir à s'en tirer habilement. Au lieu d'y employer deux ressorts séparés, indépendants l'un de l'autre, comme il le faut, et suffisamment écartés, ce que l'espace permettait amplement, il crut faire un coup de maître en tenant péniblement ses deux ressorts d'une seule pièce, très-rapprochés, quoique ayant une ouverture entre eux, mais toujours liés du haut et du bas, c'est-à-dire étant toujours d'un seul et même morceau d'acier. Ils étaient gênés l'un par l'autre et éprouvaient dans leur flexion l'effet de clinquant si essentiel à éviter. Le haut des deux ressorts était de plus fixé à demeure dans le coq ; enfin l'ouvrier avait complétement manqué aux principes de liberté de cette construction, par suite de son extrême ignorance. Les employés d'un déménagement, ayant fait osciller ce pendule de l'avant à l'arrière, cassèrent un des côtés du ressort de cette mauvaise suspension, qui avait été laissée ainsi par le peu d'importance attachée à cette pièce fort médiocre. Cet accident fut heureux dans la circonstance, car il nous détermina enfin à nous en occuper et à la rétablir suivant les vrais principes de cette partie, sans y apporter, du reste, plus de soins que la pièce ne paraissait le mériter. Mais, par l'effet de ce seul rétablissement, la Pendule, qui était habituellement fort mal réglée, prit une marche beaucoup plus régulière, avec une variation d'une minute au plus en 15 jours, et a continué ainsi pendant vingt ans qu'elle a été négligée, sauf quelques retouches éloignées à l'avance et retard, en raison de l'épaississement progressif des huiles, etc.

Ce même ouvrier, qui n'existe plus, ayant alors du courage et un désir de s'avancer dans son art, que ne secondait nullement son peu d'instruction, s'avisa de vouloir copier une pièce de cheminée établie par feu *B....*, et où l'impulsion ou réparation du pendule avait lieu par le bas de la lentille, sous la dénomination ambitieuse et fausse de *remontoir constant*. Le mouvement était placé au-dessous du pendule, etc. L'auteur de cette pièce, bien que renommé, entendait fort mal les principes du genre et même de bien d'autres, ainsi que le prouvent bien des Pendules de sa composition qui n'ont jamais bien marché, et même l'aveu écrit de sa main que l'on pourrait en voir

quelque part. La composition vicieuse de la pièce dont il s'agit ici se manifestait par plus d'un point, comme dans tant d'autres essais malheureux du même auteur. Celui-ci, entre autres, exigeait une force motrice telle, que deux énormes barillets n'en pouvaient entretenir la marche, d'ailleurs assez inexacte, qu'en réduisant en limaille leur denture, qu'il fallut graisser de saindoux comme les premières roues d'une grosse Horloge. Enfin, l'auteur lui-même renonça à cette composition malheureuse, après en avoir répandu quelques copies aux dépens des amateurs trop prévenus.

L'ouvrier qui copiait cette pièce n'était pas en état d'en comprendre le mécanisme et encore moins les défauts. Comme il en vint enfin à nous consulter, il fallut bien lui dire que, s'il l'avait fait à temps, on aurait pu lui indiquer un modèle meilleur et plus à sa portée ; mais malheureusement des ouvriers bornés ont l'ambition d'entreprendre des ouvrages hors de l'ordinaire et qu'ils ne conçoivent pas, dans l'espoir d'une réputation fructueuse, ils se trompent ainsi que le public séduit par des nouveautés sans succès et qui tombent bientôt dans l'oubli qu'elles méritent. Nous pourrions rappeler ici, à ce sujet, ce que *Ferdinand Berthoud* dit fort judicieusement des simples ouvriers qui se permettent de tracer de nouveaux calibres sans posséder, à beaucoup près, la capacité nécessaire pour ce qui exige de l'instruction et de l'expérience ; mais, pour ne pas nous répéter sans nécessité, nous renverrons à notre tome Ier, page 127, où ce passage a déjà été rapporté.

En effet, *Berthoud* a, dans cet article, parfaitement raison. Pour améliorer et perfectionner les pièces civiles et leur appliquer une partie convenable des principes adoptés dans les pièces de précision, il faudrait être profondément instruit de toutes les conditions et recherches raisonnées que l'on pratique dans ces pièces du genre supérieur, telles que les Horloges astronomiques ou d'observations et les pièces marines, qui doivent réunir tous les perfectionnements obtenus dans la mesure du temps. On risque sans cela de négliger ce que l'on pourrait en emprunter pour les pièces ordinaires, ou de mal entendre des dispositions dictées par la haute théorie, et même d'y introduire des défauts résultant du désaccord des parties que l'on y rassemble sans en bien saisir l'esprit.

1509. Nous n'entendons pas, dans tout ceci, que l'on doive ni même que l'on puisse traiter les pièces à l'usage civil comme des pièces d'observation, puisque ni le prix ni la disposition usuelle des premières ne le permettent entièrement, et que d'ailleurs leur emploi ne l'exige pas ; mais il faut savoir choisir avec intelligence ce qui peut s'y adapter, et connaître la matière à fond pour en juger sainement. C'est là ce qui manque le plus souvent dans de prétendues améliorations ou innovations, qui n'ont la plupart d'autre stimulant que le bénéfice espéré de leur nouvelle application, et d'autant plus aujourd'hui que l'extrême concurrence, en surchargeant les praticiens d'un travail à bas prix, leur enlève le temps et les moyens de s'instruire. Depuis longtemps les apprentissages ordinaires sont nuls pour l'enseignement, d'où résulte la quantité de mauvais ouvriers. On ne compte actuellement qu'un nombre infiniment réduit d'habiles artistes, tant dans les capitales que dans certaines villes ordinaires de province, dont quelques-

uns mériteraient d'être plus connus (1). Notre disposition à instruire les ouvriers par de bons exemples et à encourager les autres se manifeste assez dans cet ouvrage par des articles admis, quelque faibles qu'ils puissent paraître à des gens instruits et plus difficiles. Parmi ces articles communiqués, quelques-uns sont encore loin de la perfection qu'ils auraient pu atteindre, et souvent l'on n'y a pas profité de nos avis; car bien des gens qui obtiennent à grande peine de faibles améliorations s'imaginent déjà avoir atteint le sommet de leur art et en sont encore bien loin. Les bornes de leur capacité sont assez connues; mais faut-il pour cela les décourager? Non, sans doute; *il faut*, suivant le proverbe, *que chacun puisse vivre*. C'est au temps et à l'expérience à faire la part du mérite de chacun.

1510. Pour rentrer dans la suite de nos articles, nous remarquerons ici que parmi les meilleurs échappements avec *pendule* que l'usage a conservés, nous n'avons point encore traité de celui à impulsion libre, sans huile à la levée, et que l'on pratique avec avantage dans des pièces d'observation, et principalement dans celles à demi-secondes, dont, au moyen du coup muet ou perdu, l'aiguille peut donner les secondes entières sur le cadran.

La première application faite à la Pendule de l'échappement libre à détente et à cercle des Horloges marines, a paru appartenir à la fois à *Pierre Leroy* et à *Ferdinand Berthoud ;* celui-ci l'exécuta dans une petite Pendule à demi-secondes de médiocre volume, anciennement décrite dans le supplément à son *Essai sur l'Horlogerie.* Ce projet, repris beaucoup plus tard par son auteur, va se trouver décrit dans l'article suivant, avec les derniers changements qu'il indiqua définitivement. L'article est extrait du VII[e] et dernier volume de *Berthoud*, peu répandu, intitulé : *Supplément au Traité des Montres à longitudes*. Paris, 1807. Nous y ajouterons quelques développements utiles.

Échappement libre à détente d'une Pendule à demi-secondes de FERDINAND BERTHOUD, *exécutée sous ses yeux en* 1791, *avec les changements recommandés par l'auteur dans un dessin postérieur gravé en* 1807, *et modifié depuis par l'auteur actuel de ce Traité.*

1511. En 1791, dit *Berthoud*, je construisis et fis exécuter une Horloge d'observation avec pendule à demi-secondes, dont l'aiguille marque les secondes d'un coup, et qui, rectifiée depuis (en 1807 et seulement dans la planche donnée alors), me paraît pouvoir suppléer, pour l'observateur qui voyage, aux grandes pièces à secondes, et être d'un transport plus facile; mais ce court pendule étant moins puissant et éprouvant plus d'obstacles par ses vibrations promptes, exige une grande perfection générale dans la composition et l'exécution. L'exacte mesure du temps, par une Horloge à pendule, exige que celui-ci conserve constamment la même étendue d'arcs; que la compensation y soit parfaite et que les soins de tout le reste y répondent. Ces conditions dépendent

(1) Nous saisissons cette occasion pour citer ici M. *Court* père, horloger, à Paris, bien connu par l'étendue de ses connaissances et la bonté avec laquelle il se met à la portée des ouvriers qui vont lui demander des conseils...

de la bonne suspension du pendule, du peu de frottement de l'échappement et du rouage; de la réduction des pivots, de l'emploi des pignons suffisamment nombrés, comme aussi de celle de la grandeur et du poids des roues, et de la perfection des engrenages ; de l'exacte combinaison *éprouvée à l'étuve* des verges de compensation, de la liberté de ses effets et de la proportion du poids de la lentille pour ne pas affaisser les verges ; de la facilité de modifier la compensation, etc., etc., etc.

Les figures 1 et 2 (de notre pl. XLV) sont de grandeur naturelle, et celles vraies du mouvement de l'Horloge à échappement libre. Le rouage est composé de cinq roues, y compris celle d'échappement, contenues entre deux platines carrées, dont la première porte en dehors les cadrans, et en dedans quatre piliers qui s'assemblent avec la petite platine. La première roue A du rouage, fig. 1, fait un tour en 12 heures ; son axe porte en dedans et à frottement de canon un cadran des heures qui tourne avec la roue, et auquel, au travers de l'ouverture B, répond l'index I fixé à la grande platine : le même axe porte aussi la poulie du poids à corde sans fin, ainsi qu'un rochet auxiliaire, quand on veut remonter par la clef du carré de l'arbre. La roue A engrène dans le pignon *a* de de la roue C des minutes, dont le pivot prolongé porte leur aiguille 2. La roue C engrène dans le pignon *b* de la roue moyenne D; celle-ci engrène dans le pignon *c* de la roue de secondes E dont le pivot prolongé porte l'aiguille 3 des secondes ; et la roue E mène le pignon *d* de la roue d'échappement F. Les nombres sont en conséquence ; les 2 derniers pignons sont de 16.

La pièce G H, terminée par le haut en portion du cercle, figurant une sorte de T, est celle du cercle d'échappement H ; cette partie de cercle a, au milieu en *i*, une entaille servant de palette, sur laquelle les dents de la roue F agissant successivement, produisent sur la demi-oscillation à droite, l'impulsion ou *réparation* du pendule ; celui-ci oscille ensuite librement dans le retour à gauche du cercle H. La bascule *h* libre sur pivots avec un léger contre-poids *o*, s'engage, en cédant dans ce retour, sous le bout *g* de la détente *g f*, et la bascule, revenue de nouveau à droite, accroche légèrement la détente en *g*, et dégage la dent de la roue d'échappement, appuyée précédemment au repos en *f* sur cette détente ; alors la dent vers *h* de la roue devenue libre frappe sur la palette ou entaille *i* à son passage, pour effectuer la réparation, et ainsi de suite. On conçoit que la détente libre après le passage du crochet de bascule en *g*, retombe immédiatement entre les dents de la roue en *f* au moyen de son petit contre-poids *p* pour faire repos à la dent suivante de la roue F.

L'axe G, au bas de la pièce d'échappement, porte au dehors et à l'arrière de la seconde platine, indiquée fig. 2, la pièce M N dont N est un rouleau qui agit dans la mortaise Q de la verge du milieu du pendule, fig. 3, pour lui transmettre l'impulsion du cercle d'échappement ; aussi le bras M N est-il coudé en R pour atteindre cette verge. Le bras G H, fig. 1, et M N, fig. 2, est d'un rayon plus court que celui mesuré sur le pendule depuis le milieu de la mortaise Q, fig. 3 (où le rouleau de fourchette appuie), jusqu'au centre de suspension en *b*, même fig. ; et le rapport est établi pour que l'arc de 5 à 6 degrés dans l'échappement étant transmis au pendule par le bras M R N ne fasse dé-

crire au centre de la lentille que 3 degrés d'amplitude totale. (Nous avons supprimé depuis la fourchette du haut, fig. 2, et porté le rouleau directement dans la mortaise du pendule, fig. 3.)

Régulateur-Pendule; sa compensation et sa suspension.

1512. Le pendule à demi-secondes est représenté dans la fig. 3 avec les dimensions convenables à la compensation *absolue*, c'est-à-dire du pendule avec le mouvement marchant par les diverses températures; la correction y est même trop forte, afin de pouvoir la rectifier par l'expérience sur la marche de la pièce entière dans l'étuve (les dimensions de cette fig. 3 sont réduites à moitié, et doivent être doublées dans l'exécution); on peut donc diminuer la correction en substituant au montant T O de laiton, percé sur sa longueur pour laisser passer la partie filetée de la verge du milieu, une pièce semblable en laiton et plus courte, en remontant d'autant l'écrou P; mais, si au contraire la correction se trouvait insuffisante, la pièce T pourrait être remplacée par une semblable en zinc écroui et tiré *au banc* qui produirait plus d'effet.

Le pendule est composé d'un châssis d'acier *c d e f*, et ne se trouve formé que de trois verges d'acier et deux de laiton, parce que leur longueur est augmentée en leur faisant traverser la lentille, et même la dépasser par le bas. La traverse supérieure *c e*, de même pièce avec les deux verges latérales en acier (comme une sorte de pincette de foyer), porte les crochets CC de même pièce, qui servent à accrocher le pendule à la traverse inférieure CC des ressorts de suspension; celle-ci est fixée et assujettie au pendule par la vis S, qui ne touche point à la pièce B, largement ouverte au milieu pour laisser cette vis libre d'obéir sans contact au léger mouvement d'oscillation que lui fait éprouver le pendule auquel elle sert à fixer la traverse C C. Au bas du châssis d'acier, la traverse *d f*, aussi d'acier, est assemblée par mortaises et chevilles d'acier, avec liberté de céder en bascule à la différence inévitable d'allongement des deux verges d'acier, quoique de même nature, car dans la même matière on ne trouve pas deux verges également homogènes. Le dessus de cette traverse *d f* supporte les deux verges de laiton E G, dont les bouts du haut soutiennent la traverse d'acier L mobile en bascule sur le centre L de sa mortaise, par où elle suspend la verge du milieu I P, qui, au moyen de l'écrou P, du montant T et de la pièce O, entaillée du dessus, soutient la lentille M; celle-ci, en laiton plein, est formée de deux pièces emboîtées et réunies par 4 vis et pieds qui sont à la partie de l'arrière, pour la facilité de pratiquer à chacune la demi-mortaise verticale qui embrasse librement l'ensemble du châssis; au bas de celui-ci est l'index W indiquant sur le limbe gradué R les degrés décrits par le pendule. Le tout est établi sur une longue et forte platine de laiton portant le mouvement et servant d'*étrier* général.

SUSPENSION A 2 RESSORTS LA PLUS SOIGNÉE DE FERDINAND BERTHOUD.

1513. Dans la suspension à 2 ressorts, le lame du devant est indiquée par un simple trait de *b* en *a* figurant son épaisseur. L'autre lame semblable de l'arrière ne peut se voir

ici, mais le même trait la couvrirait, quand même il n'y aurait pas entre elles la pièce de cuivre *b*, qui porte en avant ou en arrière deux saillies formant des crochets ouverts ici par le bas.

Les extrémités de droite et de gauche de la traverse B peuvent pivoter de l'avant à l'arrière sur les bouts en pivots de deux vis portées par les ponts A A, fixés par vis et pieds sur la 3e platine ou *étrier* établi contre le fond de la boîte (et bien mieux contre un mur solide quand on le peut). La traverse B porte en avant 2 crochets en *a*, et autant en arrière, comme ceux en *b* de la traverse CC, mais ouverts du haut, pour recevoir l'un et l'autre les pivots particuliers des lames de ressort ; car les 4 bouts de ces lames sont enfilés chacun par un axe avec embase et écrou, d'un diamètre égal à la largeur des lames et qui les serrent fortement; le surplus des axes est terminé par des pivots égaux en diamètre et reposant dans les crochets des 2 traverses décrites ci-dessus, qui les reçoivent juste sans les gêner ; les embases et les écrous, touchant librement à la face intérieure des crochets, empêchent le déplacement latéral des axes des ressorts, et le tout les maintient exactement dans le même plan, ce qui exige ici une exécution très-soignée et précise. Le haut et le bas des ressorts étant soutenus de même, et leurs axes étant libres de s'élever dans les crochets du haut, on peut soulever le pendule sans forcer ni fausser les lames; il y a même de plus, dans la pièce originale de *Berthoud*, un *garde-lame* qui prévient leur torsion accidentelle et empêche que les pivots, très-libres d'ailleurs, puissent sortir de leurs crochets en soulevant le pendule. Ici, en place de ce garde-lame, les crochets du châssis en CC avoisinent le bas des ponts A A, de manière à y être libres sans y toucher dans les oscillations, et néanmoins à y appuyer en cas de mouvement brusque accidentel, pour préserver les lames, etc., etc. L'exécution et la réflexion sur cette disposition bien saisie feront suppléer aux autres détails; ceux que nous donnons ici surpassent de beaucoup la courte notice que *Berthoud* en donne. Nous devons ajouter que c'est ici la suspension à ressort la plus soignée et la plus parfaite de cet auteur, et nous croyons même pouvoir présumer qu'elle a été composée sous ses yeux par *Jean Martin*, l'un de ses meilleurs élèves, et qui, dans sa jeunesse, annonçait de rares dispositions ; il paraît au moins que c'est lui qui l'a exécutée. Nous n'y trouvons à reprocher que la trop grande longueur des ressorts, d'après les expériences récentes contenues dans un mémoire de MM. *Winnerl* et *Laugier*, approuvé par l'Institut, relativement à la proportion et à l'effet des lames de suspension pour l'isochronisme des oscillations, dont nous ferons mention plus loin.

Berthoud termine sa notice en observant « que la suspension à ressorts, bien construite, tend à rendre isochrones les oscillations du pendule. » Cela est vrai et démontré même aujourd'hui dans le mémoire cité ci-dessus, après avoir été contredit par des gens inexpérimentés, et *Berthoud* s'est borné à cette pensée annoncée ou entrevue aussi par d'autres, mais il n'a pas essayé de la vérifier et de la préciser davantage. Les expériences des auteurs du mémoire susdit donnent une solution favorable et utile de cette question importante pour la mesure du temps, ce qui n'empêchera peut-être pas de

soi-disant connaisseurs de nier l'existence et la propriété, démontrées en principe et en fait, de l'isochronisme obligé et combiné du pendule, pour prévenir le retard géométrique des grands arcs.

1514. Malgré tous les soins donnés à cette dernière pièce de *Berthoud*, que nous avons acquise peu avant le décès de cet habile artiste, l'expérience que nous en fîmes immédiatement dans notre atelier ne répondit pas d'abord à l'espérance que nous en avions conçue d'après le mérite connu de son auteur. C'est ce que nous allons développer, ainsi qu'une partie des améliorations que nous crûmes indiquées par la marche, le tout comme remarques utiles au besoin.

Cette pièce, acquise des mains de *Berthoud* peu avant son décès, transportée avec la précaution la plus scrupuleuse, mise en marche avec les plus grands soins, et observée sur les étoiles avec d'excellents instruments, donna d'abord des variations qui dépassaient étrangement toute latitude permise pour une pièce d'observation. Une des causes principales fut soupçonnée être l'emploi d'une double fourchette avec deux rouleaux mobiles sur de grosses tiges et qui causaient trop de frottement. L'auteur venait de mourir et l'on ne pouvait avoir des éclaircissements assez certains. Une de ces fourchettes très-pesantes descendait jusqu'à la lentille du pendule, entaillée même exprès pour cela ; elle fut supprimée, et l'autre fourchette en laiton fut refaite en acier, plus légère, avec quelques changements ; les diamètres des pivots des derniers mobiles, aussi fins que ceux d'une verge de Montre ordinaire, ne pouvant être réduits davantage, nous en supprimâmes seulement les portées, en y ajoutant des contre-plaques d'acier ; l'action de menée, qui durait près de toute une oscillation, ou une demi-seconde, fut réduite par nous à un instant de menée presque indivisible, par le seul transport de la bascule d'accrochement, de manière à ne dégager la roue d'échappement que vers la fin de cette oscillation, ce qui réduit la durée de la menée à moins d'un 10e de seconde, comme un léger coup de marteau instantané. Nous comptions même sur la nécessité de garnir la levée du cercle d'échappement d'un rubis, pour prévenir l'usure que devait occasionner une si grande chute, à laquelle nous n'avions eu recours que pour éviter des changements trop considérables, ne pas trop dénaturer l'échappement, et enfin comme premier essai. Mais le rubis n'y fut pas nécessaire ; la palette bien dure et bien repolie, et les pointes des dents adoucies au charbon doux en poudre fine et à l'huile avec bois de fusain, dispensèrent de la garniture en rubis, car après un an de marche la palette d'échappement ne laissait apercevoir aucune trace. La lentille, tout en laiton, fort épaisse et du diamètre de 5 pouces 9 lignes, ne pesait que 3 livres. Elle fut jugée trop faible et remplacée par une autre de 6 pouces, avec épaisseur proportionnée et du poids de 7 livres. Les poulies de la corde sans fin furent refaites d'un plus grand diamètre et avec pivots, etc. Enfin, pour couper court sur ces détails et plusieurs autres, nous éprouvâmes que la même pièce, qui, en sortant des ateliers de *Berthoud*, variait de plus de 10 secondes en plus ou moins en 24 heures, avait acquis une marche assez régulière pour ne pas s'écarter de l'exactitude de plus de 3 à 4 secondes par mois pendant une année d'épreuves, avec le même poids de 10 onces d'action sur le rouage, les mêmes arcs de 3 degrés du pendule, etc. Si nous en avions le

temps, nous essayerions encore d'y réduire la longueur des ressorts de suspension, suivant le mémoire important mis sous les yeux de l'Institut par M. *Winnerl*, habile artiste pour les pièces marines, et M. *Laugier*, membre distingué du bureau des longitudes, dont nous avons promis de rapporter les résultats à l'article du *Pendule*.

L'échappement libre à détente, décrit ci-dessus, est réputé l'un des meilleurs pour les régulateurs à demi-secondes et autres ; il comporte à la vérité 2 pivots et un engrenage de plus, mais bien compensés par l'extrême liberté dont il jouit, et que confirme son emploi. Lorsque la roue d'échappement est arrêtée au repos sur sa détente, les 2 dents du bas doivent être au même niveau de chaque côté de la verticale tirée du centre de la roue, et le cercle d'échappement doit les affleurer avec un très-petit jour, pour sûreté de n'y pas toucher, et n'enjamber sur le cercle des pointes des dents que de la quantité indispensable à l'engrenage de menée, qui, suivant nous, ne doit avoir lieu qu'à la fin de l'oscillation, en reculant d'autant vers la gauche la petite bascule de dégagement. La gravure qui donne ici la construction première de *Berthoud* ne peut guère exprimer ces précisions comme le peut faire le texte ; cet auteur faisait mener sa levée pendant toute une oscillation, ce qui en soumettait trop la *réparation* à l'empire inégal du rouage et des huiles, tandis que dans le principe *Pierre Leroy*, qui en paraît être plus probablement le premier inventeur, l'avait appliqué à la *circonférence extérieure* d'un balancier fort lourd, de 5 pouces de diamètre, placé hors de la cage du rouage de sa Montre marine, où il fut suspendu d'abord par un long fil d'acier, et plus tard par un petit ressort droit de Montre, trempés et revenus *bleu*, les pivots de ce balancier roulant du reste entre rouleaux, etc. Or, la menée et le dégagement y étaient très-instantanés. Nous avons cherché le même avantage en réduisant la menée à un choc presque imperceptible ; mais il a fallu entailler le cercle d'échappement à l'arrière de la levée, pour que la dent d'action, dégagée plus tard, ne touchât point au cercle, et que cependant elle atteignît sûrement la levée avant la fin de l'oscillation effective, ce qui nous a assez bien réussi pour en prévenir ceux qui voudraient exécuter cet échappement suivant notre méthode.

Avec le grand pendule de 5 pieds, etc., l'intervalle des battements de l'aiguille est de 2 secondes ; mais on peut trouver, par un cercle d'échappement double, c'est-à-dire passant au-dessus et au-dessous de la roue, et un double effet de détente, le moyen d'obtenir la seconde à chaque oscillation. M. *Winnerl* a déjà eu cette idée dans les dernières expériences de son mémoire, et ne compte pas la négliger.

Quantième bissextile étranger, article communiqué.

1515. Ce quantième, donné ici comme exemple des variantes possibles du genre, se compose d'une roue A de nombre et diamètre doubles de ceux de la roue de canon ou d'heures qui la mène, et qui est ici supposée à droite de la fig. 7, pl. XLIV, moyen ordinaire de minuterie.

La roue A roule sur une tige fixe et porte en dessous 4 chevilles de longueurs inégales, dont la plus courte est en avant, et celles plus longues, successivement en arrière

de sa marche qui est à gauche. La quatrième cheville, la plus longue, ne sert qu'à conduire au premier jour du mois la roue de quantième B de 31 dents inclinées ; celles-ci est à sautoir non représenté, et porte ici vers la droite 3 bascules superposées, et augmentant au besoin l'épaisseur des dents de la roue B, lorsque d'autres chevilles inégales aussi de hauteur d'une autre roue intérieure de 96 dents rencontrent les bras intérieurs des bascules, et élèvent leur dent à la hauteur de celles de leur roue ; car ces bascules s'abaissent d'elles-mêmes par leur poids, lorsque le profil couché ici de la fig. 7 est relevé droit entre le centre du cadran et le chiffre de 6 heures d'une Pendule. Un pignon de 20 ailes centré sous l'aiguille est fixé par son embase vissée à la platine, et sert à faire rouler à droite la roue satellite de 60 dents, transportée par celle du quantième ; la roue 60 a un pignon de 6 menant la roue interne de 96 dents portant 20 chevilles, de hauteurs inégales, pour soulever au besoin 1, 2 ou 3 bascules, et les mettre en prise avec les chevilles de A. La roue 96 a son limbe pointé du nombre 48 pour ses chevilles placées de 2 en 2 points, sauf un intervalle d'un point de plus après 3 chevilles, et ensuite un autre après 2 chevilles ; donc, 5 chevilles pour un an ; la révolution à gauche de cette roue est de 4 ans.

Les chevilles centrales sont pour les mois de 30 jours ; leurs intervalles d'un point laissent au mois 31 jours. A la quatrième année, la cheville moins haute de février lui laisse 29 jours pour la bissextile.

La fig. 9 est la même roue du quantième vue par-dessous. Dans la fig. 8, la cheville de septembre, sous le bras de bascule, première des 2 de suite, doit être remplacée par celle du 29 février, première des 3 de suite ; cette erreur de gravure se corrige aisément au remontage, où le 29 février doit être pris pour point de départ. Ce mécanisme exige la précision des hauteurs et des jeux et l'habitude des combinaisons du genre, pour suppléer au peu d'explication que nous permettent les nombreux articles qui nous restent à traiter. Dans l'exécution, on doit laisser toutes les chevilles trop longues, pour les raccourcir par l'épreuve, d'après l'exigence de chaque mois, et observer dans la division 48 les 2 mois consécutifs de 30 et de 31 (1).

Nota. A la fin de l'article 1512 ci-dessus, on doit ajouter que le cylindre O de compensation du pendule peut être composé de rondelles enfilées, et s'élever jusqu'au centre de la lentille creusée pour cela : ces rondelles peuvent être mêlées de métaux différemment dilatables, entaillées de tout un côté, et de la largeur de leur trou ; elles sont faciles à changer sans démonter le pendule, dont il suffit d'élever la lentille, pour introduire à leur place des rondelles d'une dilatation convenable.

(1) Feu M. Bourdier, une des gloires de l'Horlogerie en Pendules, en avait composé plusieurs.

CHAPITRE VI.

MONTRE OU HORLOGE MARINE.

CHRONOMÈTRES PORTATIFS ET COMPTEURS :

Compteur des Tierces (inédit).

1516. C'est avec raison que quelques artistes s'accordent à ne voir dans la *Montre marine* qu'une excellente Montre simple, pourvue de toutes les améliorations et perfections pour l'exacte mesure du temps, que l'art de l'Horlogerie soit parvenu à conquérir. On peut, en effet, sous le rapport du rouage, reconnaître cette vérité dans les fig. 3, 4 et 5 de la pl. XLIV, et c'est ce qui nous dispensera d'entrer à cet égard dans des explications superflues pour ceux qui ont lu et médité les articles précédents de ce traité général; mais après la disposition la plus parfaite de la force motrice et du rouage, traités avec tous les soins dont nous venons de parler et que nous avons développés ailleurs, il reste l'échapp., le balancier et son spiral, qui exigent une construction toute particulière, moins facile à confectionner avec toutes les conditions voulues, et qui constituent véritablement alors la *Montre* ou *Horloge marine*, et le *Chronomètre* ou *Garde-Temps* portatif.

Pour éviter un choix hasardé parmi diverses productions nationales et étrangères, nous prendrons pour exemple la pièce marine qui a reçu la dernière prime d'encouragement au concours établi par le Bureau des Longitudes de France; on peut en construire sur un tout autre plan et atteindre le même but, sauf peut-être quelques avantages espérés dans certaines parties, mais qui se trouvent souvent contre-balancés par une moindre perfection sur d'autres points : la seule expérience prolongée peut en décider. Il nous suffit ici que la pièce que nous décrivons ait eu, non-seulement une marche supérieure pendant tout son temps d'épreuve, mais qu'elle ait encore été accompagnée de plusieurs autres de pareille construction qui se sont soutenues à un degré très-satisfaisant dans les limites de variation fixées pour le concours, et que la marche de ces mêmes pièces ne puisse être considérée comme fortuite, puisque leur accord tend à prouver le résultat constant de leur bonne construction.

1517. Dans le plan général du rouage et calibre à *Fusée* de la fig. 3, pl. XLIV, le barillet que l'on voit dépasser un peu le rayon de la petite platine s'élève à son niveau extérieur, ouvert à cet effet, moyennant une large barrette A B, fig. 5, qui porte l'encliquetage d'armure; le ressort contenu dans ce barillet peut y faire 7 tours 1/4, et le barillet s'envelopper d'environ 5 tours 1/4 de chaîne; celle-ci, tirant sur la fusée en dedans du rouage, réduit d'autant le frottement des pivots de fusée, conformément à la méthode judicieuse de *Julien Leroy*, qui l'appliqua le premier aux grosses Horloges, et

que l on aurait dû adopter comme loi fondamentale pour toutes les pièces d'Horlogerie qui en sont susceptibles.

La roue de fusée de 81 dents porte un *rochet auxiliaire* de 120 dents inclinées, dont nous parlerons plus loin, et en dessus de ce rochet la fusée, ayant son encliquetage ordinaire contenu dans sa base ; elle est taillée pour 7 tours 1/2 de chaîne. La roue de fusée, de même diamètre que le bord saillant du barillet, mène à l'ordinaire le pignon du centre de 12 ailes, porté par la *roue de minutes* ou *grande moyenne* de 80 dents ; celle-ci engrène avec le pignon de 10 de la petite moyenne de 75 dents, qui mène un autre pignon de 10 de la roue de sec. de 30 dents (roue plate remplaçant l'ancienne roue de champ), dont le pivot prolongé vers le cadran porte l'aiguille de sec. ; celle-ci mène enfin le pignon de 10 de la roue d'échapp. de 15 dents. On voit aussi dans ce plan la place des 4 piliers de la cage auxquels la petite platine se rattache, au moyen des vis *a b c d* tenant lieu de goupilles, et d'un service plus assuré.

La fig. 4, même pl., est l'intérieur de la petite platine portant la potence C, la détente d'échapp. D, et sa barrette de repos E ; *a* est le trou du pivot de la fusée, côté du carré de remontoir ; *m* celui du pivot de la roue du centre ; *e* celui garni en rubis de la roue d'échapp., et, plus près de la potence, celui de la roue de sec. garni de même ; le reste est facile à reconnaître.

La fig. 6 présente la face extérieure de la grande platine qui doit être couverte par le cadran, et où l'on remarque une grande barrette ou pont cintré *k i l n*, recevant en *i* le pivot de petite moyenne placée du côté du cadran, et le pivot en *n* de la roue de sec., enfin en *l* celui d'échapp., garnis tous deux en rubis ; en *e*, sous un pont de fusée, on voit le doigt d'arrêt de remontoir porté à carré par la tige de la fusée, dont chaque tour fait sauter une des 15 dents de la roue de compte *f* avec sautoir *p* ; cette roue de compte, dont le canon porte sur le cadran une aiguille dite *développement de ressort*, est divisée sur le nombre 20, mais n'est fendue que de 16 vides. Les autres mobiles sont ceux de la minuterie, composée de sa chaussée avec pignon de 14 menant la roue de renvoi *g* de 56, qui, avec son pignon de 18, roule sur une tige ; ce dernier pignon mène la roue *h* de canon ou des heures de 54 dents. Les trois vis extérieures attachent le mouvement à la bate de la boîte.

On voit le dehors de la petite platine dans la fig. 5, et 1° le barillet A B, côté de son couvercle et garni d'une forte chaîne, sous la grande barrette B *d* portant l'encliquetage d'armure ; la vis *d* sert à maintenir le bout de la barrette en se vissant dans le pilier qui se trouve au-dessous ; 2° le coq R *r* qui reçoit le pivot supérieur du balancier R R, et porte le piton du bout supérieur du spiral ; P est la patte d'un tube qui s'élève jusqu'au fond de la boîte, en y laissant pénétrer la clef de remontoir, et préservant ainsi le mouvement de la poussière et des corps étrangers qui pourraient s'introduire par l'ouverture pratiquée au fond de la boîte ; celle-ci est recouverte habituellement par une pièce extérieure que l'on glisse dessus après le remontage.

1518. En ne considérant ici que le rouage de ce mouvement, on n'y trouverait au premier abord, comme il a été dit, que les dispositions raisonnées d'une excellente

Montre simple à l'usage civil, et seulement de dimensions beaucoup plus fortes; mais il faut observer que déjà tous les mobiles et les autres parties doivent y être exécutés avec la dernière perfection acquise aujourd'hui et reconnue avantageuse par une longue expérience; enfin, avec toutes les conditions rigoureuses qui ne sont presque jamais observées entièrement dans les Montres civiles, vu la difficulté de les faire accorder avec les formes, la commodité de l'usage et la réduction du prix ordinaire. Un des principaux avantages du rouage des pièces marines à suspension, est de n'être nullement gêné pour la hauteur en cage, ni pour le diamètre, ni pour les autres dimensions générales de la pièce; mais si l'on en considère la partie réglante, on y trouvera de fortes différences et des conditions à remplir qui dépassent assez celles d'une bonne Montre civile, pour faire de la Montre marine et du chronomètre de poche l'objet d'une tout autre classe d'Horlogerie; celle-ci exige exclusivement toute la pensée du petit nombre d'artistes en état de s'en occuper avec succès, et c'est pourquoi on la voit désignée par le nom de *haute Horlogerie*, qui comprend, avec les Montres marines à suspension et les chronomètres portatifs, les Horloges dites *astronomiques* à secondes ou à demi-secondes, les compteurs exacts, les thermomètres métalliques et tous les instruments les plus précis d'observation. Le calibre de la pièce marine gravée dans nos planches XLIII à XLV est celui de M. *Winnerl*, qui a obtenu à l'Observatoire le prix du dernier concours.

C'est pour les raisons exposées ci-dessus que les chronomètres de poche sont aussi presque toujours de la plus forte dimension permise par *le porter*, bien qu'il en soit fait aussi de plus petits et comme pièces de luxe; mais ces dernières sont rarement aussi régulières, aussi constantes et aussi solides, la plus forte proportion facilitant mieux une exécution rigoureuse dans les parties de détail essentielles à la précision.

L'échappement est la 1re partie qui diffère ici de la Montre civile, où réussissent si bien les bons échappements à cylindres, Duplex, à ancre, et autres à repos, tandis que dans les meilleures pièces marines ou chronomètres, le seul échappement consacré depuis longtemps est celui *à détente* et *cercle;* nous avons traité amplement des uns et des autres dans nos derniers articles sur les échappements actuels, et nous en avons assez indiqué les principales conditions pour n'y pas revenir ici, vu que le lecteur, déjà pénétré des bonnes méthodes d'exécution, saura aisément suppléer à des détails désormais superflus pour lui.

1519. Le *balancier compensateur*, 2e partie des pièces les plus difficiles à bien exécuter dans la Montre marine, est composé de cercles détachés et libres d'un bout, et attenants par l'autre à l'une des barrettes ou rayons du balancier. Ces portions de cercle sont formées d'une lame bi-métallique ou double, en acier dans l'intérieur, et en laiton par le dehors, soudées ensemble aujourd'hui, quelquefois à la soudure forte, mais anciennement à l'étain, et même assemblées dans l'origine par de petits rivets d'acier très-multipliés; ces lames bi-métalliques sont chargées de masses dites *compensantes*, et forment ainsi une sorte de thermomètre métallique qui rapproche ces masses du centre lorsque, par une température en *plus*, le spiral s'affaiblit et perd de sa force élastique, et que les barrettes ou rayons du balancier acquièrent un peu plus de lon-

gueur, ce qui ferait retarder la marche, si la rentrée de ces masses ne venait pas en annuler l'effet. On conçoit aisément que le contraire a lieu par le froid. Or, une des grandes difficultés est d'obtenir que les 2 ou 3 ou 4 lames bimétalliques, formant le cercle du balancier, se rapprochent ou s'éloignent du centre, chacune d'une quantité égale, pour ne pas faire perdre au balancier son équilibre parfait et nécessaire en tous sens par les variations de température, condition essentielle surtout dans les chronomètres portatifs, et qui devient d'autant plus difficile à conserver, que ces lames compensantes, chargées de masses, sont continuellement sollicitées de s'ouvrir à chaque vibration par la force centrifuge. L'effet de ces lames bimétalliques dépend de la proportion et de la position de leurs masses; on l'augmente au besoin en transportant les masses plus ou moins près de l'extrémité libre, ou en ajoutant des vis supplémentaires à forte tête et d'un métal plus ou moins pesant. D'autres masses, dites réglantes, se placent d'ordinaire à l'extrémité des barrettes ou rayons du balancier, et le poids ou l'effet des unes et des autres doit être augmenté ou diminué suivant l'indication du réglage; or ce réglage est une des opérations les plus délicates et importantes, et qui complète la perfection d'une pièce marine.

1520. Les figures 5, pl. XLIV et 4, pl. XLV, donnent le plan de ce balancier compensateur, garni de ses masses réglantes et compensantes. Celles-ci reçoivent des formes rondes ou en olive, ou carrées, suivant l'intention de l'auteur concernant la résistance de l'air, dont l'effet, du reste, est peu appréciable. Le même balancier se voit en profil dans la figure 4, pl. XLV, au-dessous de son spiral cylindrique, et portant à droite et à gauche des masses compensantes, fendues à moitié pour recevoir les lames bimétalliques auxquelles ces masses sont fixées par une petite vis de pression. Les deux masses réglantes, pour un seul côté, se présentent sur le devant de la fig. 4, et les deux autres en arrière ne peuvent être vues, mais on les trouve indiquées dans l'autre fig. 5 de la pl. XLIV. L'écrou des parties où se placent ces vis, toujours d'un métal pesant et à fortes têtes, est fendu pour faire ressort avec un frottement gras assez facile à vaincre sans forcer les pivots du balancier. On a vu dans nos figures d'échappement libre à détente, que les pivots du balancier ont une forme conoïde courbe très-allongée et sans portée, parce qu'ils sont maintenus par des coquerets ou contre-plaques, et, dans les cas analogues, tout pivot à contre-plaque doit être formé de même. Lorsque les corrections deviennent légères, les masses à têtes vissées peuvent, en les tournant, s'éloigner plus ou moins du centre du balancier pour corriger une légère différence d'avance ou de retard, ou pour rétablir l'équilibre de son cercle; quelques vis supplémentaires sont aussi ajoutées parfois à un point voulu des lames, pour ne pas déranger l'effet des autres, etc.

1521. La 3e partie, qui présente aussi ses difficultés et exige de grands soins, est le spiral cylindrique de la Montre marine, qui doit avoir la propriété de produire l'isochronisme des vibrations, soit des plus étendues, soit de celles bornées à de petits arcs, principalement par l'épaississement des huiles. Cette propriété si précieuse du spiral, découverte d'abord par *Pierre Leroy*, et calculée ensuite par F. Berthoud, dépend de la

longueur moyenne déterminée par la seule expérience de tout spiral bien calibré, assez long pour satisfaire à la condition d'*isochronisme* qui est de rigueur. Ce spiral est formé d'excellent acier méplat, tiré ou laminé, connu sous le nom de *fil de bobine*, d'égale épaisseur et largeur partout, trempé et ramené par le *revenu* à l'état de ressort, conditions qui exigent de grands soins d'exécution ; quelques-uns ne le trempent pas, et se contentent de l'élasticité que lui procure l'écrouissage de la filière ou du laminage; d'autres le font en or allié de rosette ou d'argent, et écroui; mais alors ce ressort est plus exposé à changer son point de repos, par l'effet de vibrations accidentelles de trop grande étendue qui peuvent forcer le spiral, et faire que le mécanisme n'arrive plus aussi juste à être ce qu'on appelle d'*échappement*, ce qui ne peut que changer sensiblement la marche de la Montre. L'artiste, habitué à son calibre, qu'il a soin de ne point changer, en trouve d'autant plus facilement le point d'isochronisme de ses spiraux et leur longueur, qui, dans l'ébauche, doivent produire au moins 10 tours de lame. *Un spiral trop long n'est plus isochrone.*

1522. Nous avons dit précédemment (1517) que la fusée d'une pièce marine est pourvue d'un *rochet auxiliaire* : c'est, comme on sait, un moyen usité pour entretenir la marche du rouage et de l'échappement pendant le remontage. Cette adjonction, indispensable ici, est même imitée dans plusieurs Montres à secondes pour l'usage civil quand elles sont à fusée ; celles à barillet denté n'en ont pas besoin, parce que leur ressort moteur, toujours remonté par le centre, continue à tirer pendant le remontage sur le crochet de virole du barillet, et par suite sur le rouage. Le mécanisme auxiliaire de la fusée se compose d'un ressort d'acier formé en C, et pourvu ordinairement, à chacune de ses extrémités, d'une cheville, l'une en sens contraire de l'autre. Ce ressort se loge dans une creusure de la roue de fusée, qui reçoit dans un trou l'une des chevilles ; l'autre cheville est reçue dans un trou du rochet, espèce de roue plate, garnie de dents inclinées et dites *à rochet;* cette espèce de roue porte alors en dessus son encliquetage simple ou double, fig. 7, pl. XLV, toujours logé à l'ordinaire dans la base de la fusée ; cette base est dépassée par le rochet de toute la denture inclinée de celui-ci, dont les pointes de dents n'arrivent qu'un peu en arrière du fond de la denture de la roue de fusée, fig. 7 et 8, pl. XLV. Mais on y voit la différence suivante d'avec la disposition plus commune que nous venons de décrire : l'auteur que nous suivons ici fixe une extrémité de son ressort à la roue, en terminant ce bout par une patte avec pied et vis ; l'autre extrémité est armée d'une cheville double, dont un côté pénètre dans une mortaise de la roue, l'autre dans un trou du rochet, avec un petit jour, tant en dessus qu'en dessous du ressort, exposé dans l'autre construction à se gripper contre la roue ou le rochet auxiliaire. On conçoit du reste que, dans l'une et l'autre disposition, la chaîne du barillet armé, tirant sur la fusée, entraîne, par son encliquetage ordinaire, la roue de rochet auxiliaire ; que celle-ci s'appuie sur la cheville double du ressort auxiliaire, qu'elle fait un peu plier pour entraîner la roue de fusée, sans que sa cheville atteigne tout à fait l'autre extrémité de la mortaise. Or il y a dans la cage un cliquet à ressort fixé à la grande platine ; les dents du rochet auxiliaire glissent d'ordinaire

sous le crochet de ce cliquet, dans le sens de n'y pas arc-bouter : lors donc que la clef de remontage fait rétrograder la fusée, le rochet auxiliaire, retenu en ce sens par le cliquet à ressort, ne peut rétrograder que de près d'une dent au plus, et, laissant reculer la fusée seule, il maintient l'armure du ressort auxiliaire contre la roue de fusée, assez longtemps pour que l'on ait tout le loisir de remonter la chaîne sur sa fusée. On peut voir dans le calibre, fig. 5, ce cliquet dont la tige allongée fait ressort et dont la tête crochue atteint le rochet auxiliaire dans le sens voulu ; cette tête passe tout près du pilier à droite de la cage.

Telles sont, en abrégé, les principales différences de la Montre marine ou du chronomètre d'avec la Montre civile ; mais les soins d'exécution et les prévisions qu'il faut porter dans les effets seraient la matière au moins d'un demi-volume, si nous entreprenions de les détailler. Ce travail, le plus exigeant de la *haute Horlogerie* et dont les succès lui ont mérité ce titre, exige un apprentissage à part, auprès d'artistes renommés, et les bénéfices qu'il peut atteindre sont rarement proportionnés aux peines et aux soins qui en procurent le succès ; il exige une application exclusive, qui tienne toujours l'esprit tendu aux effets à produire et à la confection exacte des diverses parties. S'il faut surveiller attentivement les ouvriers qui préparent les ébauches et ceux qui finissent les pièces à un certain degré, il n'en faut pas moins que le tout soit revu et repassé par l'artiste lui-même, qui ne peut guère s'en reposer sur personne, surtout pour l'exécution de ses balanciers, de ses spiraux et de son échappement, dont il doit assurer les préparations toutes importantes.

1523. Pour entrer néanmoins dans quelques principaux détails d'exécution, nous ajouterons ici que les lames composées ou bimétalliques d'un balancier compensateur se forment aujourd'hui d'acier et de laiton, ou alliage analogue le plus dilatable, fondu dans une rainure de l'acier, et qui s'y trouve alors soudé naturellement par la fusion. Or, il est essentiel que cette soudure ne contienne ni bulles d'air ni solution de continuité, soit en elle-même, soit avec la lame d'acier, qui doit lui rester intimement attachée en dedans ; car la lame d'acier du dehors, nécessaire à contenir le laiton ou l'alliage pendant la fonte, est en définitive supprimée pour laisser le laiton libre d'obéir à la température et de faire courber plus ou moins la lame intérieure d'acier qui lui reste soudée. C'est sur ce principe que sont construits, avec quelque différence de moyens, plusieurs thermomètres bimétalliques.

Pour ébaucher un balancier compensateur, on emploie la plupart du temps une rondelle ou disque plein, d'acier fin, percé d'un trou central ; on tient ce disque plus grand d'environ 1 ligne, ou 2 millimètres de rayon de plus que celui du vrai balancier du calibre, et moitié au moins plus épais. On creuse carrément sur le bord d'une des faces une rainure très-profonde, c'est-à-dire en conservant au fond un quart de ligne au plus d'épaisseur, et qui, étant parfaitement détergée, est remplie et même au delà de bon laiton ou de soudure d'argent ou d'autre alliage en grenaille, le tout très-propre (chaque auteur a sa composition et ses procédés) ; on y ajoute la quantité suffisante de *borax* ou fondant qu'enseigne l'usage des soudures et brasures, et l'on place le tout horizontale-

ment au fond d'un creuset, en faisant en sorte que la composition ou le métal fusible liquéfié par le feu remplisse complétement la rainure, en restant parfaitement soudé et adhérent partout aux parois de l'acier, et surtout à celles de l'intérieur. On enlève d'abord à la lime, et en définitive sur le tour, le bord extérieur d'acier; on amincit aussi le disque par dessous, jusqu'à ce que l'on découvre la rainure pleine de cuivre ou alliage; on creuse ensuite le milieu du disque pour ne lui laisser qu'un fond d'acier, comme à un barillet d'un grand diamètre et de peu de hauteur; on réserve à l'intérieur un cercle d'acier de champ, qui ne doit avoir, étant fini, que la moitié au plus, ou même que le tiers de l'épaisseur restée au métal fondu, pour équilibrer autant que possible leur résistance mutuelle; on met ensuite le fond à jour, en y conservant deux barrettes opposées, ou trois ou quatre, suivant le nombre adopté des lames compensantes; on réserve autour du trou central un cercle plein assez large pour le fixer par 2 ou 3 petites vis sur une portée pratiquée à l'axe du balancier. On sait que chaque portion de la lame bimétallique devra être, en dernier lieu, coupée en un point voisin de l'extrémité des barrettes, ce qui formera autant de segments de cercle, libres d'un bout et adhérents de l'autre à l'extrémité opposée d'une autre barrette, et susceptibles ainsi de mouvoir leur partie libre, suivant l'impression de la température; or ces lames, portant en des points tâtés leurs masses compensantes, auront leur effet équilibré par des masses réglantes vissées à de petites portions de cercle réservées au bout des rayons, suivant la construction ordinaire, car leur distribution varie d'après la combinaison particulière de l'artiste. Les masses réglantes et les barrettes forment, à très-peu près, la moitié du poids total du balancier, et l'autre moitié de son poids est formée des masses compensantes et de leurs cercles bimétalliques.

1524. Quant au spiral, on le forme en le roulant sur un manchon d'acier mince et creux, et portant une rainure en hélice, de manière à lui conserver 10 tours au moins, au bout desquels il est contenu par des vis à têtes larges; il reçoit dans cet état une trempe soignée, après avoir été tourné continuellement au milieu du feu pour lui faire acquérir la chaleur rouge cerise la plus égale. On le blanchit à la ponce sur son manchon, on les fait *revenir* ensemble au bleu un peu gris, c'est-à-dire couleur de ressort, et on laisse les pièces bien refroidir avant de les séparer; ce n'est que dans les premières épreuves de la marche de la Montre qu'on raccourcit le spiral jusqu'à ce que sa puissance, d'abord trop faible parce qu'il est trop long, acquière en s'armant une progression de force proportionnée aux arcs du balancier parcourus ou à parcourir, ce qui fait que les plus grands arcs menés plus vivement ont une durée égale à celle des plus petits, moins vifs, le tout dans de certaines limites, comme entre 3 quarts de tour, et un seul quart (de chaque côté); enfin, pour que les grandes et petites vibrations soient ce qu'on nomme *isochrones*. Il convient aussi de s'assurer si les arcs d'une étendue intermédiaire possèdent la même propriété, ce qui paraît dépendre de l'égalité de trempe et d'épaisseur d'un spiral dont tous les tours se développent et se resserrent également. Cette épreuve ne peut avoir lieu qu'en faisant marcher la Montre, et en faisant décrire au balancier ses plus grands arcs, pendant 5 ou 6 heures de suite, *par*

une température moyenne, et le ressort armé tout en haut; on répète la même épreuve pour les petits arcs, exactement pendant le même temps, et le ressort presque au bas; enfin on l'éprouve de même pour les arcs intermédiaires donnés par une armure moyenne du ressort moteur. Si la marche est exactement de même durée dans ces diverses épreuves, la longueur du spiral entre ses deux pitons est alors celle qui procure l'*isochronisme*. Il n'est pas nécessaire que la pièce suive le temps moyen dans ces épreuves, mais que son avance ou son retard soient constamment les mêmes dans une température égale. Le réglage, pour que la pièce suive le temps moyen, dépend du poids total du balancier et de sa force acquise dans ses vibrations, car son plus ou moins de pesanteur et de grandeur n'altère pas sensiblement la propriété isochrone de son spiral, sauf la légère influence du frottement des pivots ; mais, dans le cas d'une forte différence de poids ou de grandeur, on est obligé de retoucher à la longueur du spiral, qu'il faut toujours éprouver encore en dernière analyse, quand toutes les autres parties sont établies au point fixe voulu. Ce degré d'isochronisme doit être en effet tâté en y comprenant le jeu et tous les effets de l'échappement, ses résistances, le frottement de ses pivots, etc., ce qui produit en résultat un *isochronisme composé*. Par exemple, lorsque l'huile des pivots s'est épaissie, les petits arcs perdent une plus grande partie de leur vitesse, comparativement aux grands arcs, et comme les voyages de long cours ne permettent pas d'en renouveler les huiles, on se trouve obligé, par prévoyance dans le réglage, de faire avancer les petits arcs sur les grands de quelques secondes en 24 heures, pour prévenir le retard qu'ils éprouveront plus tard lorsque l'huile sera moins fluide; cette altération n'apporte du reste aucune difficulté dans les premiers temps, où l'on sait que les arcs du balancier ne diminuent pas sensiblement.

En raccourcissant un spiral trop long, il convient d'en ramener les deux extrémités vers le centre par une courbe adoucie et formée peu à peu au moyen de pinces à spiraux chauffées convenablement et qu'on laisse même refroidir dans leur action, afin que la lame conserve sa courbure. Celle-ci emploie 1/2 tour et même 3/4 de tour pour se rapprocher du centre à environ la moitié du rayon des autres tours restés concentriques. C'est ce qui est indiqué fig. 6, pl. XLV, dans le plan au-dessous de cette figure du spiral cylindrique qui est dans le haut. Le piton attaché à l'un des bouts du spira par une cheville méplate et très-peu en coin, vers *a*, est celui du bas du spiral ; l'autre partie opposée du piton, vers *b*, ne touche à rien, elle n'est conservée que pour l'équilibre. La courbure des extrémités du spiral a pour but de le faire développer plus cylindriquement, et d'éviter qu'il ne se jette de côté dans les vibrations, ce qui changerait l'équilibre de l'ensemble, la distribution de sa puissance, et même l'isochronisme des arcs de diverse étendue. Le degré de courbure et le point fixé dans le piton ne réussissent que dans une certaine latitude; c'est une affaire d'expérience propre à chaque artiste, et qu'il doit chercher et raisonner. *V. l'autre piton, fig.* 5, *pl.* XLIV.

1525. Ce n'est qu'après avoir arrêté sur le calibre une grandeur moyenne du balancier compensateur que l'on exécute le spiral proportionné, que l'on essaye avec un balancier simple et d'abord trop léger; et comme il fait trop avancer la pièce, on le charge

de plusieurs masses à vis, distribuées sur son pourtour toujours conservé en équilibre, jusqu'à ce qu'on ait trouvé la lenteur qu'il doit avoir pour que la pièce suive le temps moyen. C'est d'après cette épreuve que l'on fait le partage de son poids total entre les masses réglantes jointes au poids des barrettes, et les masses compensantes jointes au poids de leurs portions de cercle bimétallique, pour exécuter définitivement le vrai balancier compensateur. On obtient la plus grande étendue des arcs de vibration, que nous avons bornée ci-dessus à 3/4 de tour au plus de chaque côté du repos, par la force du grand ressort moteur du barillet. Quelques-uns prennent pour règle de tenir la force motrice, transmise à l'extrémité de la dent de la roue d'échappement prête à échapper à la levée, en équilibre avec la résistance du spiral, ce qui oblige de tâter et assujettir la force motrice sur celle du spiral isochrone trouvé. Alors c'est celui-ci, plus difficile à créer, qui règle la pesanteur du balancier, et par suite la force du grand ressort moteur. C'est le contraire de ce que l'on pratique dans les Montres à l'usage civil, où le poids ordinaire du balancier et la force du spiral sont subordonnés à la puissance motrice établie d'après la grandeur des platines et d'après une longue expérience plutôt que par des rapports calculés. Mais il en est autrement avec le spiral isochrone une fois trouvé, que l'on conserve précieusement pour lui subordonner le reste des forces mécaniques, méthode qui semble en effet plus catégorique.

Ces détails ne représentent pas tout à fait la méthode des artistes exercés aux travaux et au réglage des pièces marines; car, ne changeant pas volontiers leurs calibres, et avec raison, il leur est plus facile de pressentir les résultats des proportions arrêtées d'après leur expérience, ce qui leur fait perdre bien moins de temps. Mais nous avons cru devoir en développer l'esprit par ces détails pour ceux qui désirent en prendre une première idée, en les avertissant qu'un bon apprentissage auprès d'un maître habile et bienveillant les instruira plus et mieux que de longues explications écrites; ils trouveront dans les ateliers de ces maîtres distingués, lorsqu'ils seront assez avancés pour en profiter, des leçons de théorie et de bonne exécution que les livres ne peuvent transmettre qu'avec une extension que ne nous permet pas ce traité général, où nous nous bornons à donner succinctement un aperçu de la différence entre l'Horlogerie marine dite *haute Horlogerie*, et celle de l'usage civil et commercial.

Après avoir beaucoup varié la disposition actuelle du balancier compensateur, on est revenu aujourd'hui à celle proposée anciennement par Pierre Leroy, fils de *Julien*, et qui était né pour devancer ses contemporains. Le balancier de Berthoud, imitation déguisée de celui de P. Leroy, était plus compliqué, lors même que Berthoud abandonna sa compensation fautive du pince-spiral; cet auteur reconnaissait déjà la nécessité de ne pas changer la longueur agissante du spiral, déterminée pour l'isochronisme, et, par une contradiction singulière, il adoptait encore, dans le même temps, un pince-lame mobile par un gril compensateur, ce qui faisait continuellement varier la longueur du spiral, en sorte que les vibrations, modifiées seulement par l'épaississement des huiles ou par les variations de la force motrice, ne pouvaient rester isochrones; mais il s'en corrigea par la suite, en employant le seul balancier compensateur.

On sait que Pierre Leroy et F. Berthoud ébauchèrent en France le genre des Montres marines, et que les progrès du premier furent aussi rapides qu'il était intelligent, neuf et heureux dans ses idées. Il obtint aussi, le premier, deux prix doubles pour le succès très-satisfaisant de ses premiers essais; ceux de Berthoud, son compétiteur, furent très-lents et le résultat d'un travail opiniâtre; mais malheureusement Pierre Leroy, moins protégé par la suite, se dégoûta de ces travaux, et peut-être de quelques accidents arrivés à ses pièces. Ses Montres marines et autres ouvrages d'Horlogerie ont disparu. Il ne nous reste de lui qu'un demi-volume, plein de pensées neuves et utiles, tandis que Berthoud, dépositaire de tout ce qui appartenait en ce genre à la marine royale, a rempli près de trois gros volumes de ses essais dans cette seule partie. Il imprimait aux frais du roi, et nous avons déjà remarqué que ce fut plutôt l'histoire de ses longs travaux, souvent malencontreux, dont il ne voulut pas laisser ignorer la grande quantité, qu'un traité positif réduit à l'utile. Depuis cette époque l'expérience, l'observation et la comparaison des productions étrangères ont apporté de grands changements dans la construction de nos pièces marines; elles sont aujourd'hui plus simples, moins volumineuses et plus parfaites.

1526. Il s'est établi assez récemment une variété de construction dans ces Montres dites aussi *à longitudes*, qui consiste dans l'emploi d'un barillet denté, et en supprimant la fusée; mais cette disposition n'est pas nouvelle : Pierre Leroy l'avait adoptée avec succès dans ses pièces marines. Cette méthode fut peu imitée d'abord, peut-être par l'influence de F. Berthoud, qui ne l'employait pas, et fut longtemps le seul horloger pour la marine. Dans ces derniers temps, M. Henry Robert a publié un mémoire sur ce sujet, où il établit très-judicieusement, sinon la supériorité du barillet denté, au moins l'avantage équivalent de sa substitution à l'usage du barillet avec chaîne et fusée; les artistes occupés de ce genre se trouvent partagés sur cette question. Il paraîtrait, en effet, que l'une de ces constructions pourrait équivaloir à l'autre. Le barillet denté, avec un ressort tel que nous l'expliquerons bientôt, supprime la fusée, le rochet, son ressort et son cliquet extérieur, puisque, dans le remontage du ressort moteur qui a lieu par son centre, le dernier tour de dehors ne cesse pas d'agir sur le rouage. Ce ressort, moins épais, peut être plus doux, plus liant, plus élastique; on est affranchi de la rupture de la chaîne, accident très-rare néanmoins, vu la force et la bonne qualité des chaînes employées avec la fusée. Il y a de moins le frottement de deux gros pivots, et dans l'exécution moins de main-d'œuvre. Mais d'un autre côté la puissance du ressort du barillet denté diminuant beaucoup, du haut au bas de son action, l'étendue des vibrations du balancier diminue à proportion, ce qui exige un isochronisme plus parfait dans le spiral qu'avec la fusée, dont la force sensiblement égale produit peu de changement dans l'étendue des vibrations, et supporte mieux un spiral moins parfaitement isochrone. Cette dernière considération peut faire équilibre à tous les avantages du barillet denté. Pour tirer un meilleur parti de ce dernier, il faut que son ressort soit diminué légèrement d'épaisseur, c'est-à-dire à partir du dehors un peu plus fort, jusqu'au centre où il est un peu plus faible, mais de la seule quantité nécessaire pour que les

tours restent séparés ou détachés pendant la marche, qualité assez difficile à obtenir, et dont on ne peut être assuré qu'avec un barillet d'essai dont le couvercle est découpé à jour. On conçoit que c'est ici le cas de rejeter la disposition des ressorts faibles dans leurs derniers tours du dehors, qui restent collés ensemble pour faire équilibre à ceux du dedans plus forts, au moyen du frottement des lames extérieures entre elles, frottement dont le degré dépend de l'état de l'huile et de celui de la température, sous l'empire desquels une bonne force motrice ne doit pas être assujettie quand il s'agit de précision. Si la méthode des dernières lames frottantes entre elles a pu être adoptée par abus, et pour abréger le travail des pièces de l'usage civil à barillet denté qui n'exigent qu'une médiocre exactitude, il n'en peut être de même du moteur principal d'une Montre marine. Heureusement le ressort diminué en fouet, mais bien moins que pour une fusée, supprime assez l'inconvénient du frottement des lames; reste la différence de force entre le haut et le bas du ressort, qui, comparativement, exige un spiral plus isochrone; nous ne déciderons pas la question du choix, qu'il faut laisser résoudre à l'expérience, et nous appliquerons ici l'adage connu : *adhuc sub judice lis est;* « le « procès attend le jugement. » Nous observerons en passant que, dans les ateliers, le barillet pourvu d'une denture est appelé barillet *tournant*, expression inexacte, et qui n'exprime pas sa différence d'avec celui à chaîne et fusée, puisque l'un et l'autre sont obligés de tourner; le nom de barillet *denté* est donc plus convenable.

1527. Quant au *réglage* des pièces marines et des chronomètres portatifs, il faut que chaque artiste se fasse une méthode basée sur la construction qu'il a adoptée. Dans tous les cas, quand on commence à se livrer à ces travaux, il convient de faire marcher la pièce successivement, au chaud et au froid, et à plusieurs reprises, afin que les effets de la compensation, de l'isochronisme et toutes les autres parties prennent une assiette fixe; après quoi, connaissant sa tendance, on la fait marcher par un degré d'inclinaison un peu plus fort que celui qu'elle pourrait recevoir accidentellement par le roulis du navire, pour vérifier de nouveau l'équilibre du balancier; alors, et suivant le besoin, on déplace les masses, on les ressort ou les rentre, ou l'on en change le poids, etc., suivant l'indication de la marche, ce qui suppose, dans l'application des moyens, les notions de physique relatives qu'un élève intelligent ne peut manquer d'acquérir dans un bon apprentissage. Il faut, par exemple, en touchant aux vis des masses, éviter de forcer les lames bimétalliques, ce qui pourrait en altérer et l'équilibre et les rapports; souvent une lame un peu forcée, ou même le mouvement simplement arrêté, ne reviennent à leur effet précédent et fixe qu'après un certain temps de marche, lequel doit précéder une nouvelle observation. Les effets différents, d'après la construction et la sensibilité particulière de la pièce, ne peuvent être détaillés et se déterminent par la connaissance de la construction, accompagnée du raisonnement et de la pratique; on conçoit que celui qui a construit la pièce avec les moyens de lui faire produire les effets voulus peut seul observer à quel point le résultat y satisfait, et quelles sont les parties susceptibles de modification. Les moyens de réglage n'étant au fond qu'une suite de ceux de construction et une conséquence nécessaire de celle adop-

tée avec connaissance de cause. ceux qui apprennent à copier exactement des modèles de bonne qualité, d'un professeur habile, prennent de lui ses moyens de réglage, ce qui est plus court pour les mêmes pièces; mais, quand la construction diffère, on n'a pour guide que le raisonnement, l'expérience et les connaissances générales acquises.

1528. Les Horloges ou Montres marines, placées à bord des navires, ont besoin d'une caisse et d'une suspension inévitable, pour y conserver à très-peu près la situation horizontale pour laquelle elles sont construites. La pl. XLIII offre ce mode de suspension dans les fig. 7 et 8. Le mouvement décrit dans les articles précédents est contenu dans une boîte de laiton cylindrique, ayant à peu près autant de diamètre que de hauteur, et vue en profil en A B, fig. 8. Le mouvement de la fig. 4, pl. XLV, est renversé dans cette boîte, et le balancier s'y trouve dans le bas, afin que le cadran de la face opposée se présente en dessus, garni de sa glace enchâssée dans une lunette, avec léger frottement par sa gorge sans charnière, et maintenue en place par deux vis latérales vers A et B de la fig. 7, pl. XLIII. Cette figure donne le plan général de la suspension réduit à moitié, et il suffit d'en doubler toutes les dimensions pour avoir celles de l'original. Au centre du plan, fig. 7, on voit le cadran de la pièce, indiqué par des cercles pointillés; les chiffres 60 marquent le midi commun des heures et minutes, et du cercle des secondes plus petit placé en dedans, entre 11 et 1 heure; la petite section de cercle, entre le centre et le point de 6 heures, est destinée à la division du *développement du ressort* marqué par son aiguille; les premiers cercles extérieurs au cadran sont ceux de la lunette et de la boîte; celle-ci est suspendue par les seuls canons *b b* aux pivots qui terminent deux vis, portées par un grand cercle de laiton *a h a b;* ce cercle est assez grand pour que la boîte puisse, sans y toucher, faire une révolution sur les pivots *b b*, afin de la renverser pour le remontage dont l'ouverture est au bas au fond de la boîte; le grand cercle de laiton est lui-même suspendu aux bords de la caisse, sur les pivots *a a* de deux vis portées par deux pièces de laiton fixées aux parois de la caisse. Ces deux axes de suspension, de la Montre et du grand cercle, à angle droit entre eux, se prêtent aux inclinaisons en tout sens de la caisse, sans les communiquer au mouvement, restant toujours à très-peu près horizontal, malgré les balancements du navire, comme la boussole de mer. Cette sorte de suspension est dite à *Cardan*, du nom de son ancien inventeur. Le fond de la boîte du mouvement est en outre chargé d'une masse fixe. Un compartiment triangulaire D reçoit la clef de remontoir, dont la tête porte un encliquetage de précaution. Un autre compartiment en C porte un verrou qui se glisse au besoin dans un troisième canon *c* porté aussi par la boîte du mouvement, pour empêcher ses oscillations dans le transport à la main ou en voiture, mais que l'on retire pour laisser la suspension libre pendant la marche de la pièce à bord. Le couvercle *f*, fig. 7 et 8, ouvert à l'équerre, porte en *g* un tasseau qui empêche la clef de quitter sa place; le dessus de ce couvercle est entaillé en *e* d'une coulisse qui, retirée, laisse voir une glace circulaire, et au travers, le cadran de la pièce marine, sans ouvrir la caisse habituellement fermée à clef et déposée dans une armoire au pied du grand mât. L'officier *de quart* a seul les

clefs de l'Horloge et de l'armoire; la table de celle-ci, où est placée la caisse de la Montre, doit être pourvue de quatre règles fixées à vis et garnies de drap, qui emboîtent jusqu'à près de 1 pouce de hauteur le bas de la caisse de l'Horloge, afin que les secousses accidentelles du bâtiment ne la fassent pas heurter contre les parois de l'armoire, etc. Il est facile de reconnaître dans ces deux fig. 7 et 8 la charnière, la serrure *h*, les anses *i i* de la caisse, et le reste de sa construction de forme cubique. Presque toutes les parties métalliques y sont en laiton pour éviter les effets du magnétisme aimantique, hors quelques pièces rondes en acier du mouvement, et qui, tournant continuellement sur elles-mêmes, n'ont aucune influence remarquable.

DES CHRONOMÈTRES OU GARDE-TEMPS PORTATIFS, ET DES COMPTEURS.

1529. Après avoir indiqué la construction et les soins exigés par les Montres marines, autant que l'espace nous le permet, il nous reste peu d'observations à faire sur les chronomètres de poche, qui ne sont qu'une réduction du volume des premières, avec la seule différence de la boîte, que l'on doit garantir des accidents du *porter* par une chaîne passée au cou. Le chronomètre portatif, conservant plus habituellement la situation verticale du plan de son balancier, exige dans celui-ci un équilibre encore plus parfait, s'il est possible, que celui toujours à peu près horizontal de la pièce marine; du reste, les dispositions sont les mêmes à la hauteur près; aussi les chronomètres de poche de forte dimension sont-ils généralement les meilleurs, vu la perfection plus facile et plus assurée de leurs parties délicates. (1518, à la fin.)

Le chronomètre portatif, pourvu de toutes ses conditions, est aussi le meilleur instrument d'observation et le plus commode pour les sciences, comme pour la mesure du temps, surtout lorsqu'il faut transporter celle-ci, ou y apprécier de plus petites subdivisions que la seconde. Le rouage de la Montre marine est disposé, le plus ordinairement, pour battre 14,440 vibrations par heure ou 4 coups par seconde, dont 2 coups dits perdus, ne se laissent ni voir ni entendre, ce qui n'empêche pas de les compter; le chronomètre de poche, plus exposé aux agitations du *porter*, en bat d'ordinaire 18,000, ou 5 par seconde; on y apprécie même jusqu'au 10ᵉ, si l'instant observé tombe au milieu juste entre deux battements, ce qui n'est guère qu'une approximation. Les observateurs studieux et zélés parviennent peu à peu à s'en servir sans beaucoup d'efforts, et c'est le meilleur parti à prendre.

Des compteurs à aiguilles doubles.

1530. Quelques observateurs, redoutant la difficulté de saisir à la loupe le nº de la seconde, de compter les battements suivants à l'oreille et de les noter rapidement, opération si facile pour les artistes, ont désiré des compteurs disposés exprès, avec deux aiguilles de secondes, dont l'une reste immobile par la pression d'un bouton extérieur, tandis que l'autre continue sa marche. On a alors plus de temps pour prendre note de

la seconde et de sa fraction ; puis la pression d'un autre bouton, ou la suivante du même rend libre l'aiguille arrêtée, qui rejoint subitement celle marchante; ces particularités peuvent bien satisfaire la paresse ou la crainte de la dépense d'un vrai chronomètre, mais elles ne sont pas garanties des variations de température, et, si elles l'étaient, leur prix serait plus élevé que celui de ce dernier, à raison de la plus grande complication de leur mécanisme; d'ailleurs les *compteurs* sont d'un volume aussi fort, au moins, que la boîte de laiton d'une pièce marine, et par suite peu portatifs. Plusieurs artistes en ont établi d'eux-mêmes ou sur commande, et les derniers de M. Winnerl avaient même double aiguille de seconde, de minute et d'heure. Les compositions de ces artistes ne nous ayant pas été communiquées personnellement, parce qu'ils se réservent peut-être de les publier eux-mêmes, nous ne pouvons que renvoyer à cet égard aux Bulletins de la Société d'Encouragement, qui en a adopté le rapport et publié la gravure.

COMPTEUR DE TIERCES (INÉDIT).

1531. Nous citerons ici, à l'occasion de l'article précédent, un autre compteur comportant la précision des 60es de seconde, ou des *tierces;* cet instrument, très-simple et solide, en forme de Montre, peut donner, dans les observations astronomiques et physiques, une précision très-supérieure aux 5es et 6es de seconde, que les chronomètres ne peuvent dépasser pour que leurs battements puissent se compter. Nous venons de parler des 6es de seconde, parce qu'en effet il y a des chronomètres à 21,600 vibrations par heure et à 6 par seconde, qui sont encore plus à l'abri des agitations du porter, surtout en voyageant à cheval.

Quant aux 10es de secondes des tableaux ou registres de marche, il faut bien remarquer que ces 10es ne sont qu'approximatifs, et que les 100es qui y sont portés ne sont qu'une méthode de calcul écrit (une sorte de *monnaie de compte*), tandis que les 60es de notre compteur sont précisément battus pendant la seconde. Or, quand l'observateur ferait erreur d'une tierce, on aurait toujours les 10es à une seule tierce près, qui seraient plus réels et plus près de la certitude que des 10es estimés, qui sont souvent un quart ou trois quarts, ou un tiers ou deux tiers de seconde, et que l'on estime d'ordinaire 5/10es. La distance, par exemple, des fils réticulaires d'une *lunette méridienne* ou de celle dite murale, ne laisse souvent pas le temps de noter la seconde du chronomètre et sa fraction, et de reprendre avec la loupe la seconde de l'aiguille pour en continuer le compte à l'oreille; on arrive trop tard à la lunette, le fil suivant est manqué, et avec lui le milieu moyen de l'observation des fils devenue nulle. Mais la distance entre chaque fil étant bien connue d'avance en tierces, au moyen de notre compteur, même à une tierce près, elle permet de suppléer au fil manqué, d'après l'observation de l'un des fils voisins reconnu bon, et d'avoir, comme à l'ordinaire, le milieu moyen. Ce n'est ici qu'un exemple entre tant d'autres auxquels peut s'appliquer l'usage d'un compteur de *tierces*.

Cette invention nous fut suggérée dans nos observations à l'occasion suivante : Nous

avions acquis un petit quart de cercle mobile du célèbre *Borda* (auteur du *Cercle entier*); cet instrument, d'exécution anglaise et soignée, en équilibre sur un rubis, au moyen de contre-poids ingénieux, devait, suivant son auteur, être préservé par son inertie propre des mouvements du navire, et donner à bord des observations presque aussi exactes que celles faites à terre. Mais ce projet n'eut pas de succès. Ayant donc acquis l'instrument dans une autre intention, nous y ajoutâmes pour observer à terre, un cercle d'horizon divisé par feu *Fortin* en minutes, au moyen d'un *vernier*, deux niveaux croisés, un axe mobile rodé et un support-trépied à vis calantes, avec division, etc. Mais, la lunette ayant peu de champ, les fils de son réticule sont très-rapprochés, et ce fut pour remédier à l'inconvénient exposé ci-dessus, de manquer l'observation d'un fil, que nous imaginâmes le compteur de *tierces*, qui a très-bien réussi en nous donnant exactement la distance des fils réticulaires.

Un artiste de talent, renommé par la subtilité de ses travaux, à qui nous faisions part alors de notre idée, nous écrivait à cette époque : « Je suis fâché que vous perdiez *du bon temps* à un projet où Arnold (l'ancien) a échoué. » Il nous expliquait aussi le mécanisme d'Arnold, dont le principe nous parut erroné; mais, nos moyens étant très-différents, nous persistâmes, et le succès étonna assez notre confident, curieux de n'être pas dépassé, pour qu'il en essayât de son côté un autre d'une disposition différente, mais borné aux 10es de seconde, perceptibles pendant l'observation. Cet instrument, désapprouvé néanmoins par les astronomes comme divisant l'attention, n'eut pas de suite et ne fut pas publié. Notre compteur de tierces, applicable à tout sans inconvénient, mais fait alors pour notre seul usage, ne fut pas publié non plus; il est encore inconnu (1).

1532. Nous ne devons pas négliger de prévenir que tous les instruments d'observation à balancier et spiral doivent être scrupuleusement garantis de tout mouvement circulaire donné à la boîte ou caisse qui les contient, dans le sens surtout du plan des vibrations du balancier, pour éviter des rebattements dans l'échappement, et que le spiral ne soit forcé au delà des limites de son élasticité. On peut même s'étonner que la suspension actuelle n'ait pas eu aussi pour but de prévenir cet inconvénient; car il semble possible de disposer l'équipage de suspension de manière à pouvoir rouler sur son centre dans le

(1) Depuis l'époque déjà reculée où l'auteur s'est occupé du compteur de tierces, d'autres Horlogers en ont construit de différents systèmes. Tels sont M. Bréguet, M. Perrelet, qui, un des premiers a construit les compteurs à doubles aiguilles, dont l'une reste stationnaire sur le cadran, tandis que l'autre continue son mouvement.

M. Jacob, ancien élève du gouvernement, présenta à la Société d'encouragement, en 1830, un nouveau compteur dont l'aiguille reste stationnaire pendant l'observation. M. Henry Robert s'est aussi occupé de cette question en 1834.

M. Winnerl, en 1838, présenta à l'approbation de la Société d'encouragement plusieurs compteurs de son invention dont la description se trouve dans les Mémoires publiés par la Société d'encouragement.

Tous ces différents systèmes de compteurs ont leur mérite suivant l'usage auquel on les destine.

sens des vibrations, et à laisser la Montre marine rester, par son inertie, en arrière d'un mouvement accidentel de ce genre communiqué à la caisse. Mais il y faut un moyen simple qui, compliquant peu l'armure de suspension, n'en puisse augmenter sensiblement les frais, vu que les pièces marines étrangères établies en fabrique ont déjà trop réduit le prix de ces instruments, au désavantage du bénéfice modéré que l'artiste isolé a du moins le droit d'en retirer.

1533. *N.* Les instruments de haute Horlogerie, ainsi que tout autre produit des arts libéraux, n'étant point d'un usage ni d'un besoin général, ne peuvent pas devenir l'objet du *commerce* proprement dit, sans tomber à la longue dans l'avilissement, et, par la réduction résultante de leur valeur, dans une décadence qui en arrête nécessairement la perfection, en obligeant de faire beaucoup et mal, à vil prix. Il n'y a plus de grands peintres ni même de médiocres artistes en Italie, où les arts du dessin avaient jadis acquis tant d'éclat, parce que, les artistes s'y étant trop multipliés, leurs ouvrages devinrent si communs, et tombèrent à un prix si bas, qu'ils ne pouvaient faire vivre leurs auteurs : le pays en était encombré; aussi n'y trouverait-on pas aujourd'hui à placer un bon tableau, une belle statue, pour la dixième partie et même souvent pour la centième de leur ancienne valeur. Il a donc fallu abandonner cette carrière, aujourd'hui fermée dans ce pays.

On avait eu naguère à Paris le projet d'établir en fabrique des copies imprimées à l'huile, des meilleurs tableaux des grands maîtres de l'art, sous le nom de *Litochromie.* Si cette entreprise avait eu de la suite, elle aurait ruiné les plus habiles artistes et réduit les autres à l'*hôpital*. Ce sont les objets usuels et communément utiles, produits des arts mécaniques et manufacturiers, dont on doit exciter et multiplier la meilleure confection au plus bas prix, pourvu que les ouvriers puissent en vivre aisément, ce qui devient alors avantageux pour les consommateurs comme pour l'exportation commerciale; mais il n'y faut pas confondre les produits des beaux-arts, des arts libéraux (et la haute Horlogerie y tient son rang). S'ils concernent les sciences, les objets d'un prix élevé seront acquis par les établissements d'instruction et d'utilité publiques; s'ils n'intéressent que le goût et le luxe des amateurs, ils n'en produiront pas moins leur effet favorable à la circulation des richesses, et poursuivront leurs progrès vers la perfection.

N. B. « Au moment où nous imprimons ces articles, nous apprenons que M. *Henry Robert*, cité ci-dessus pour le barillet denté, vient de recevoir la grande médaille d'or de la *Société d'encouragement*, d'après la communication d'une *Montre marine* de cet artiste, avec application d'un barillet denté, dans une composition plus simple que celle de feu B., qui en employait deux avec un mauvais pignon du centre de 9 ailes. On peut remarquer, dans la nouvelle *Montre*, plusieurs autres différences raisonnées, la *détente* sur pivots, etc., détaillées et gravées dans le Bulletin de cette Société, en novembre 1846, et publiées aussi séparément par l'auteur, ainsi que ses diverses améliorations dans les pièces civiles. »

HORLOGE ASTRONOMIQUE

A PENDULE, DITE AUSSI RÉGULATEUR A SECONDES.

1534. L'Horloge astronomique à pendule est aussi, comme dans l'article précédent concernant la Montre marine, le résumé de tout ce que l'art a pu obtenir de régularité dans l'espèce; mais l'Horloge à pendule comporte encore plus de constance, comme instrument fixe, et est ordinairement moins exposée aux grandes et brusques variations de température; d'ailleurs, l'emploi du *pendule*, régulateur principal du tout, tenant plus directement ses propriétés de la nature que de l'art, offre considérablement plus de puissance et d'exactitude que le balancier et son spiral. Mais ce même moyen naturel et si précieux de diviser exactement le temps exige aussi une connaissance particulière de sa nature propre, et des meilleures conditions qui doivent accompagner son emploi. On sait assez déjà que le pendule fut découvert par *Galilée*, et que, malgré diverses opinions, il ne paraît avoir été appliqué à l'Horloge, pour la première fois, que par *Huyghens*, qui en étudia plus profondément les propriétés; ce sont elles que nous allons développer à la suite de l'Horloge astronomique ci-après.

1535. Nous avons proposé à la fin de notre premier volume le moyen de se pourvoir d'un régulateur économique, avec un ancien mouvement de Pendule, en y pratiquant quelques changements faciles et peu dispendieux, afin d'obtenir une régularité suffisante au réglage des Montres; dans l'article actuel, il s'agit de réunir des moyens d'exactitude qui ne peuvent résulter que d'une construction établie exprès, créée de toutes pièces, d'une composition où l'on ait mis à profit toutes les recherches et les données de l'expérience et du génie de plusieurs hommes habiles qui y ont appliqué leur intelligence, enfin, où la simplicité du plan se joigne au choix des meilleurs moyens.

1536. Nous exposerons d'abord ici, comme modèle plus ordinaire, un mouvement simple et sagement ordonné, d'un temps déjà ancien, mais où cependant cette sorte d'ouvrage. étant assez soignée, peut encore servir d'exemple d'une bonne composition et d'une exécution fidèle, sinon brillante, qualité apparente qui, du reste, n'en est pas une ici; car ce n'est pas l'éclat d'une belle exécution qui fait marcher le mieux des pièces plus modernes, mais une composition bien raisonnée (1). Ce n'est pas que nous prétendions dédaigner entièrement une *belle facture;* elle devrait annoncer une exécution parfaite dans les parties utiles, ce qui malheureusement n'est pas toujours vrai, parce que souvent la main habile n'est pas accompagnée de l'instruction et de l'intelligence, et que même il convient de se défier à cet égard des ouvrages dont l'extérieur offre trop d'éclat, et qui peuvent être négligés aux points essentiels.

1537. La fig. 1, pl. XLVI, est le calibre vu par l'arrière de ce mouvement fait à Paris par *Denis Masson*, pour un Crésus de ce temps. La force motrice est un poids mouflé

(1) Un ouvrier peu instruit et peu intelligent de Ferdinand Berthoud, et qui avait ce qu'on appelle *une belle main*, attribuait à cette faculté le succès des pièces du maître, qui lui répondit: « Ce « n'est pas de mains que nous avons le plus besoin, mais bien de tête; » et des discussions à ce sujet s'étant trop souvent renouvelées, l'ouvrier orgueilleux, ignorant et borné fut renvoyé.

par une *corde sans fin*, avec contre-poids. La corde agit alors sur une poulie garnie de pointes (voir l'indication donnée à la pl. II de notre 1er vol., fig. 1, relative à l'Horloge d'Huyghens, auteur de cette méthode); cette ancienne disposition a été longtemps conservée, et ce n'est que dans les régulateurs plus parfaits des derniers temps qu'elle a été remplacée par un tambour ou cylindre cannelé en vis et enveloppé de la corde entière, soit mouflée d'une poulie près du poids, soit simple et sans cette poulie. (Les trous de cette pièce *disponible aujourd'hui* sont garnis en alliage d'or.)

1538. Les figures de la pl. XLVI sont réduites à la moitié en tous sens de l'original que l'on tenait alors de trop grande dimension; en sorte qu'étant exécutées suivant les proportions actuelles de ce dessin, l'Horloge astronomique n'en vaudra que mieux, comme nous l'expliquerons ailleurs. On pourrait cependant, au besoin et en cas de destination pour un grand local, augmenter la présente dimension de sa moitié en plus, ou la doubler tout à fait et telle qu'elle est dans l'original, pour la proportionner à un cadran qui devrait être vu à distance, surtout pour le simple usage civil.

La poulie à pointes est fixée sur l'arbre de la première roue qui porte 112 dents, et engrène avec le pignon de 16 de la roue *de temps*. L'une et l'autre ont leurs pivots sur la même ligne de niveau, et comme la gorge de la poulie est d'un grand diamètre, c'est-à-dire très-rapprochée de celui de sa roue, et que la corde et son poids tirent du côté de l'engrenage, les pivots du premier mobile sont très-peu chargés, ce qui diminue beaucoup leur frottement, en quoi l'on peut voir que l'habile auteur de cette pièce n'a pas négligé la pensée de *Julien Leroy*.

La roue de temps de 106 dents mène le pignon de 14 de la roue de minutes; il s'ensuit qu'en plaçant le cadran à la hauteur de l'œil, avec la proportion de la figure, la descente du poids, mouflé par la corde sans fin, permet aisément à cette Horloge astronomique de marcher beaucoup plus d'un mois, le poids ne descendant, pour la plus grande dimension, que de 4 pieds; il ne descendrait que de 2 dans notre réduction, mais l'époque du 1er de chaque mois préviendrait l'oubli du remontage.

La roue des minutes porte 96 dents et engrène avec le pignon de 12 de petite moyenne qui a 90 dents; celle-ci mène le pignon d'échappement de 12 ailes porté par la roue d'échappement de 30 dents taillées pour la grande ancre de Graham. Ce mouvement très-simple est chargé, dans l'original, de conduire, par sa chaussée de minutes, une équation annuelle disposée comme celle que nous avons donnée, d'après Berthoud, dans notre pl. XXI, expliquée (art. 765 et suiv.), ce qui nous dispense de la répéter ici. Nous ne conseillons pas d'ailleurs cette surcharge dans une Horloge astronomique, bien qu'elle n'influe presque pas sur la marche du rouage, puisqu'elle se compose de pignons menant les roues, avec un avantage de levier qui rend leur peu de résistance presque insensible : mais ces annexes sont rejetées par les observatoires, ainsi que les sonneries, quantièmes, mouvements astronomiques, etc., suivant le principe juste et souvent émis par nous-même, que le mécanisme le plus simple, quand il est bon, est toujours plus régulier et moins susceptible d'imperfection.

1539. Dans ce calibre, la roue d'échappement dont l'axe prolongé porte l'aiguille de

secondes sur le cadran, est placée au-dessus de la roue du centre, et les secondes sont marquées sur un petit cadran à part, entre le centre des aiguilles de minutes et heures et le chiffre de midi; cette aiguille de secondes est alors beaucoup plus petite que celle des minutes, et ne charge pas autant l'échappement que les grandes aiguilles actuelles à secondes concentriques; celles-ci opposent d'abord leur inertie au départ de la roue à chaque oscillation, pour la faire ensuite frapper avec la force acquise de l'aiguille sur les repos de l'échappement, résultat désavantageux à sa liberté; nous adoptons encore moins l'usage de faire passer la tige des secondes au milieu de l'axe des minutes dont elle augmente le diamètre des pivots et par suite le frottement, ou bien de faire mener la minuterie par un pignon prolongé du mouvement qui nécessite, pour en prévenir l'ébat, l'adjonction d'un ressort traînant sur un des mobiles de minuterie, en y produisant un frottement de plus : on sent aisément que l'ancienne construction plus simple que nous présentons est préférable.

La minuterie fig. 2 est celle ordinaire, moins les dispositions particulières pour mener l'équation, et pour lesquelles nous avons renvoyé à notre planche XXIe. Les bonnes dispositions de ce mouvement, jointes à une exécution consciencieuse, nous déterminèrent à acquérir cette pièce, que nous possédons encore en ce moment. Le pendule à secondes était à tige simple d'acier, méplate, de 3 pieds 8 lignes, etc.; à l'époque de sa construction, les moyens de compensation n'étaient pas encore perfectionnés, bien que la dilatation des métaux fût connue; nous y avons substitué un autre pendule, compensé par deux lames bi-métalliques chargées chacune d'un poids mobile; elles agissent dans le sens propre à modifier la correction au besoin; il a été composé par *J. Martin*, qui fut le dernier et l'un des meilleurs élèves de F. Berthoud, et avait déjà satisfait par une semblable construction aux expériences de deux savants astronomes, physiciens, habiles calculateurs, et très-exigeants. La tige de ce pendule est garnie d'un *curseur* mobile par une roue d'encliquetage, et propre à ne produire en 24 heures que moins d'un 100e de seconde. Nous traiterons de ce mode de compensation et de réglage à l'article prochain des diverses sortes de pendules. L'échappement de cette pièce était, dans l'origine, celui dit à *double levier*, très-bien exécuté, et où les plans de levée étaient portés par chaque dent de la roue en laiton qui rongeait les bords étroits des palettes. Nous comptons y substituer l'ancre de Graham, embrassant 12 dents 1/2, à palettes garnies en rubis, avec sa roue ordinaire, afin de supprimer 4 pivots et le rouleau de l'ancien échappement; il ne restera que sa forte dimension et des premiers mobiles un peu lourds. La construction que nous venons de décrire peut suffire aux exigences ordinaires des observatoires; ils ne sont pas toujours aussi bien pourvus, et l'on peut adopter celle-ci avec confiance, quoique ce ne soit pas encore le plus haut degré de perfection que l'on ait atteint actuellement, lorsqu'on a voulu ou pu en faire la dépense. Un degré supérieur sera développé du reste un peu plus loin, à la suite de l'exposition ci-après de ce que l'on connaît des propriétés du pendule et des conditions actuelles d'une bonne suspension; celle du pendule de la pièce actuellement citée est aujourd'hui à deux ressorts. Le pendule de cette ancienne pièce est maintenant celui

moderne indiqué en petit fig. 5 et 6 de la même planche et exécuté par ledit Martin, comme toutes les dernières Pendules de Ferdinand Berthoud. Ce pendule, fig. 5, a sa compensation formée de lames bi-métalliques recourbées, au lieu d'être droites comme les premières de Martin. Chaque lame porte une petite sphère de laiton, ramenée tout près et dans le plan de la tige du pendule. La vis de rappel et sa coulisse pour *mettre l'échappement* sont placées sur le pendule au lieu de l'être sur la fourchette, et à une hauteur convenable au calibre, la fourchette devant avoir à peu près la dimension de la hauteur des platines. Ce sont des modifications que nous y avons jointes et que nous proposons comme plus avantageuses. Nous reparlerons de cette partie et du curseur qui s'y trouve joint ici, à l'article du pendule compensateur dudit Martin, qui avait aussi exécuté tous ceux à gril, définitivement adoptés par F. Berthoud. (*Toute mesure se prend sur un calibre tracé et non sur les planches.*)

1540. Mais, pour obtenir de tout régulateur à secondes l'exactitude dont il est susceptible, il faut toujours en établir le mouvement contre un gros mur à l'abri des ébranlements par voitures ou autres causes, portant du haut un crochet fortement scellé, et deux autres plus bas qui traversent le fond de la boîte sans y toucher, et soutiennent seuls et directement un fort étrier de métal, auquel le mouvement et le pendule sont attachés, ou adopter quelque autre disposition de ce genre qui soit très-solide. La planche du fond de la boîte, et qui s'en sépare au besoin, est aussi fixée à part contre le mur, et a ses ouvertures pour les pièces de scellement garnies de coton recouvert de taffetas collé pour arrêter la poussière, et quand le mouvement et le pendule y sont fixés, le reste de la boîte, à glaces ou non, ne sert qu'à couvrir le tout; en un mot, il faut faire en sorte que l'Horloge, ne communiquant point à la boîte, ne puisse aucunement être ébranlée par les chocs accidentels que celle-ci peut éprouver (1). *V., fig.* 3, *le profil du rouage; et, fig.* 4, *le plan pour la corde sans fin.*

DU PENDULE THÉORIQUE

ET PAR SUITE, DU PENDULE RÉEL A TIGE SIMPLE, PUIS DU PENDULE COMPENSATEUR, ET DE LEUR SUSPENSION.

1541. Les notions théoriques du pendule, principalement relatives à son emploi dans l'Horlogerie, seront rapportées seules ici, et pour le surplus nous renverrons aux ouvrages mathématiques qui ont traité ce sujet par des méthodes plus rigoureuses, ces méthodes n'étant pas nécessaires à ceux qui imitent sagement de bons ouvrages et n'en-

(1) A la suite de l'article ci-après sur la théorie du pendule, nous donnons le plus haut degré récent des meilleures Horloges astronomiques dont nous ayons connaissance, afin que l'on puisse choisir suivant l'exigence du cas; c'est toujours d'une construction simple qu'il s'agit, mais qui, par les soins qu'elle est susceptible de recevoir et par son emploi, est actuellement le chef-d'œuvre de l'Horlogerie. Il faut remarquer à ce sujet que l'on en cite deux de *Harrison*, que l'on prétend n'avoir pas varié de plus de 5 secondes par an, et l'on ajoute qu'une autre Horloge astronomique de lui ne s'était pas écartée du temps moyen de plus d'une minute en dix années. Berthoud n'y croit pas; mais avec les perfectionnements simples d'aujourd'hui, un pareil résultat ne paraîtrait plus impossible.

treprennent pas d'innover. Les artistes assez familiarisés avec le calcul trouveront néanmoins ici les premières idées théoriques sur cette matière, et pourront les étendre à l'aide des auteurs spéciaux; nous aurions pu les en extraire, parce qu'ils sont tous d'accord sur les mêmes principes, mais nous avons préféré suivre, abréger, et même commenter quelquefois, ce que M. de Lalande en a exposé dans un chapitre de *Lepaute*. Le motif de ce choix est la communication fréquente de l'artiste avec le savant qui, par suite, a développé les premiers principes du sujet, d'une manière plus accessible dans les ateliers, aux hommes intelligents et assez zélés pour faire marcher le raisonnement de pair avec la pratique. On pourra aussi, comme préparation, consulter d'abord nos définitions en tête de notre tome premier, où nous avons essayé de donner quelques premières idées du *pendule;* on les y trouvera sous ce même mot après la préface.

1542. Le pendule réel est un corps d'un certain poids, suspendu à une tige de manière à pouvoir faire des oscillations autour d'un centre ou axe de suspension, après qu'on l'a écarté de la verticale, où il tend à revenir dès qu'il est laissé libre. La puissance de la pesanteur ou gravitation, ou attraction terrestre, devient l'unique cause du retour du pendule à la verticale qu'il dépasse, et de la suite de ses oscillations, que l'Horlogerie s'attache à entretenir seulement, sans en altérer la durée naturelle; cette durée dépend, comme on le sait, de la longueur *virtuelle* du pendule.

Le *pendule théorique* est supposé, mathématiquement, réunir tout le poids de sa masse en un seul point sans étendue; avoir pour tige une ligne sans pesanteur; être suspendu au centre de ses mouvements sans frottement ni résistance, et osciller même dans le vide.

1543. Comme ce pendule idéal ne peut être exécuté, on en approche le plus possible par l'emploi d'une sphère ou boule du métal le plus lourd, afin que, sous moins de volume, elle éprouve moins de résistance dans l'air; un fil métallique très-délié attache cette sphère à son centre d'oscillation, au moyen d'un large anneau d'acier trempé, oscillant sur le tranchant très-légèrement arrondi d'une espèce de lame de couteau trempée dur, et fixée sur un mur solide à l'abri des ébranlements; le tranchant de cette lame, tourné vers le haut, doit conserver une position horizontale : le fil de la sphère est attaché au bas de cet anneau. Avec ces dispositions, si la distance entre le centre de la sphère et le tranchant du couteau est de 3 pieds 8 lignes 57 (57/100es) et avec des oscillations d'environ 1 pouce 1/2 d'étendue, on possède à très-peu près le pendule théorique à secondes du temps moyen; nous disons à très-peu près, parce que le poids du fil, quelque fin qu'il soit, a toujours une pesanteur dont la théorie fait abstraction, et que le pendule théorique est aussi supposé n'avoir que des oscillations infiniment petites, qu'on ne pourrait apercevoir ni compter. Celles ordinaires de 2 à 3 degrés, qui sont bien plus perceptibles, éprouvent déjà, par leur amplitude, un retard de plus de 4 secondes en 24 heures, ce qui n'empêche pas de s'en servir pour fixer la durée des oscillations, et par suite la longueur particulière d'un pendule *composé* et réellement appliqué à l'Horloge; car le retard de l'air et de l'amplitude des arcs du pendule d'expérience est une quantité calculée par la théorie, mais qui du reste peut être facilement atteinte, en réglant la

pièce, par moins d'un tour d'écrou du bas du pendule; on doit toujours se réserver, dans l'exécution, ce moyen de correction, en laissant même à cet écrou une latitude d'ascension et de descente de 12 à 15 lignes, moitié au-dessus et moitié au-dessous de la longueur trouvée, et cela pour d'autres causes, comme celles des différences de pesanteur de verge en certains points, par des pièces de rapport, par un curseur, etc., ainsi qu'on le dira plus loin en parlant des précautions pour éviter des erreurs dans cette construction. Nous allons maintenant reprendre les principales observations de M. de Lalande.

1544. « Le *pendule composé,* dit notre savant géomètre, est celui dans lequel on considère plusieurs corps pesants fixés sur la longueur C M, fig. 7 et 9, pl. XLVI. Si, par exemple, au lieu de supposer la masse du corps M réunie en un seul point (mathématique) M, on suppose une sphère pesante ayant son demi-diamètre en MG, soit alors que la ligne C G ait elle-même une certaine pesanteur, ou soit qu'il y ait deux poids comme A et C, fig. 9, le pendule, dans l'une ou l'autre de ces deux conditions, deviendra un pendule composé, parce que sa pesanteur, n'étant plus réunie en un seul point mathématique comme on l'a vu ci-dessus, se trouvera distribuée sur différentes parties de la longueur de la verge, ou du diamètre de la sphère comme en M, fig. 7, et en A et C, fig. 9. »

Il faut remarquer ici que les oscillations de la sphère M n'étant produites que par sa tendance à se rapprocher du centre de la terre, tendance que nous nommons sa *pesanteur*, c'est parce qu'elle est attachée à son centre d'oscillation, autour duquel elle peut tourner, qu'elle n'obéit à la gravité qu'en parcourant un arc de cercle au moyen duquel elle opère la partie de sa descente qui lui est permise ; car ce corps est plus bas en E qu'en M ou en K. On voit que les lois de la descente des *graves* s'appliquent aussi à la théorie du pendule.

1545. « Tous les corps pesants, continue l'auteur, abandonnés à eux-mêmes, descendent, c'est-à-dire s'approchent du centre de la terre, et y sont attirés avec la même vitesse, à moins que la résistance de l'air ne s'y oppose. Une boule d'or ou de plomb et une petite plume de cygne descendent aussi rapidement l'une que l'autre sous le récipient de la *machine pneumatique,* où l'on a produit le vide de l'air; elles parcourent à très-peu près 15 pieds par seconde. On appelle *pesanteur* (comme on l'a vu ci-dessus), *gravité* naturelle, ou *force accélératrice,* la force ou *attraction* qui fait descendre les corps et les rapproche du centre de la terre; or, cette force s'exerçant également sur toutes les parties du corps, il n'y a aucune raison qui puisse les faire descendre plus vite lorsqu'elles sont réunies en plus grande quantité dans l'or, le plomb, le mercure, etc., ou en moindre quantité dans la plume ; mais l'action ou l'effort qu'elles peuvent produire par leur chute peut être fort différent, parce qu'il est le *produit* de la *masse* par la *vitesse,* parce que plusieurs portions de matière étant en grand nombre et agissant ensemble sur un obstacle, produisent d'autant plus d'effet.

« La gravité naturelle des corps (leur attraction), a été reconnue agir *en raison directe des masses, et en raison inverse du carré des distances.* C'est-à-dire qu'un même corps,

moitié plus près de la terre qu'il n'était, en est attiré quatre fois plus, 4 étant le carré de 2 ; de même aussi, 3 fois aussi loin ou plus loin, il est attiré 9 fois moins, parce que le carré de 3 est 9, etc. Ainsi les corps plus éloignés de la terre y descendent moins vite, et *vice versâ*, etc.

1546. « *Galilée* aperçut le premier que les espaces parcourus par la descente d'un corps augmentent comme les nombres 1, 3, 5, 7, 9, etc. Les corps lancés en hauteur retardent en montant dans la même proportion inverse, et retombent suivant la proportion directe ci-dessus.

« Si le corps P, fig. 8, au lieu de descendre verticalement, est obligé de suivre un plan incliné P S; étant parvenu en S, il aura acquis la même vitesse que s'il était tombé suivant la perpendiculaire P R. Dans un demi-cercle tel que A G C, fig. 10, un corps qui descendra de A en G sur le plan incliné A G, ou de G en C sur le plan incliné G C, tombera toujours exactement dans le même espace de temps qu'il aurait mis à descendre verticalement de A en C, en suivant le diamètre A C; il en sera de même pour A *g* et *g* C, et pour tout autre triangle rectangle inscrit dans un demi-cercle et ayant son angle droit à la circonférence, tel que ceux A G C ou A *g* C. Le seul énoncé de ces vérités que nous ne pouvons développer davantage faute d'espace, mais qui sont généralement reçues comme démontrées, suffit ici pour cette explication des effets et des propriétés du mouvement oscillatoire.

1547. « Le pendule simple C M, fig. 7, occupe, dans son état naturel de repos, la ligne verticale C E, parce qu'il ne saurait descendre plus bas que le point E de son arc; si on éloigne le pendule de sa verticale, en le portant de E en M, sa masse se trouvera plus élevée de la quantité F M, ou de celle semblable E D, que l'on appelle le *sinus-verse* de l'arc E M ; elle descendra donc de M en E, et accélérera son mouvement suivant la loi ordinaire 1, 3, 5, 7, 9, etc.; mais, étant parvenue en E, le pendule aura acquis une vitesse capable de le faire remonter à la même hauteur de l'autre côté ; il ira donc jusqu'en I et décrira l'arc E I; ces deux arcs, ou ces deux demi-oscillations, l'une ascendante et l'autre descendante, équivalent à une oscillation entière.

« Si ces oscillations sont fort étendues et sujettes à augmenter ou diminuer, elles ne seront point *isochrones*, c'est-à-dire que les grandes ne se feront point en un temps égal à celui des petites; car celle qui ne commencerait ou ne s'étendrait qu'en K, serait plutôt achevée que si elle commençait ou s'étendait en M ; le chemin de M en E étant plus long que celui de K en E, il faudrait plus de temps pour le décrire. Mais si ces oscillations sont très-petites, comme de 1 ou 2 degrés, les arcs étant alors presque égaux à leurs cordes et les cordes G C et *g* C, fig. 10, réduites à 1° ou 2°, étant parcourues en temps presque égaux, les arcs le seront aussi *à très-peu près*.

Nota. Il s'ensuit que plus les arcs sont habituellement étendus, moins ils sont isochrones, à cause des plus grandes variations de cette même étendue ; et par suite, que les arcs très-petits, mais variables aussi dans leur petitesse, approchent seulement plus d'être isochrones : enfin, que les petits arcs d'oscillation praticable, ayant nécessairement une certaine étendue, qui varie inévitablement, ne sont jamais absolument isochrones, mais

qu'ils approchent d'autant plus de l'être, qu'ils sont plus réduits. On doit conclure de là ce que l'on doit penser de ceux qui soutiennent que les oscillations du pendule, les vibrations du balancier avec son spiral, celles des cordes sonores, etc., ont naturellement leurs arcs parcourus d'une manière isochrone. La géométrie, comme l'expérience de l'art amplifiée par la répétition des effets, l'oreille même exercée des grands musiciens, souvent plus sensible que les moyens physiques d'observation, donnent un démenti formel à ce paradoxe que l'amour-propre et l'ignorance du sujet opposent sans démonstration à des principes reconnus pour certains.

1548. « Dans le cas de ces oscillations fort petites, la durée de chacune sera égale à 355/113es (ou à 3 fois et 7/791es) du temps qu'il aurait fallu à un corps pesant pour descendre de deux fois la hauteur C E du pendule, c'est-à-dire pour descendre en parcourant le diamètre entier du cercle que décrit ce pendule. Il est à remarquer que 355/113es est à peu près le rapport du diamètre à la circonférence ; ainsi l'on pourrait par ce moyen savoir à très-peu près combien durera l'oscillation d'un pendule simple dont la longueur serait donnée, pourvu que l'on sût par expérience quel est, sur le lieu, le temps que les corps mettent à tomber de différentes hauteurs ; mais, comme on ne saurait déterminer avec exactitude la durée de la chute des corps, à cause de leur grande vitesse, et qu'il est beaucoup plus facile à compter les oscillations d'un pendule dans un temps donné, c'est au contraire par le nombre d'oscillations d'un pendule dont la longueur est donnée (celle depuis l'axe ou centre de suspension, jusqu'au point ou centre d'oscillation ou de percussion), qu'on trouve exactement en combien de temps les corps tombent d'une hauteur donnée vers la terre. L'*attraction* générale est un des premiers principes du mouvement des corps.

1549. « On démontre, par exemple, que le carré du diamètre d'un cercle est au carré de sa circonférence, comme la longueur du pendule est au double de la hauteur d'où un corps descend pendant une oscillation du pendule ; ainsi, pour savoir quelle quantité d'espace les corps graves parcourent en une seconde, on mesurera la longueur du pendule à seconde de la manière décrite ci-après, et l'on trouvera 440 lignes, 57 (57/100es). On dira, par une règle de trois, le carré de 113 diamètres du cercle est au carré de 355, comme 440 lignes 57 est à un 4e terme dont on prendra la moitié, ce qui donnera 15 pieds 1 pouce 2 lignes 08 (8/100es) parcourus dans la première seconde.

1550. « On comprend donc que la durée des oscillations d'un pendule simple dépend, et de la *gravité* ou force accélératrice produite par l'*attraction* centrale, et de la longueur du pendule. Si la force accélératrice devenait plus grande qu'elle n'est sur la terre, les corps tombant avec plus de vitesse, les oscillations du pendule seraient plus promptes. La durée d'une oscillation est en raison inverse de la racine carrée de la force accélératrice, ou, si l'on veut, les pesanteurs sont en raison inverse du carré des temps que durent les oscillations ; c'est-à-dire que, si la force accélératrice devenait quadruple, la durée des oscillations deviendrait seulement deux fois moindre.

1551. « Si la durée des oscillations de différents pendules est la même, leurs longueurs virtuelles seront dans le même rapport que les gravités du lieu. Si les longueurs sont

égales, les temps seront en raison *inverse* des forces accélératrices, et les nombres des oscillations faites en même temps seront dans le rapport des *racines* des forces accélératrices. On pourrait être surpris de ce que nous considérons ici des pendules qui ont différentes gravités, puisque, les hommes ne faisant jamais d'expérience du pendule que sur la surface de la terre, la gravité est toujours la même pour eux; mais il faut observer à cet égard deux choses : 1° Que cette théorie est nécessaire lorsqu'il est question de pendules qui font leurs oscillations dans des milieux résistants, où leur gravité diminue en raison de celle du fluide ; 2° que, depuis que l'on connaît l'aplatissement de la terre à ses pôles, on a observé que proche de l'*Equateur* où l'on se trouve plus éloigné du centre de la terre que proche des *Pôles*, la gravité est moindre (à l'équateur) ; et que, par conséquent, les pendules qui seraient réglés proche des pôles retarderaient sous l'équateur de plusieurs secondes par jour. Sous l'équateur, ont est éloigné du centre de la terre d'environ 3,281,000 toises, et sous les pôles seulement de 3,262,690 toises (différence 18,310 toises, ou environ 9 lieues de poste).

1552. Nota. Il est encore une autre cause de retard pour le pendule, dont M. *de Lalande* n'a pas jugé à propos de parler en ce moment, bien qu'il l'a connût parfaitement, et qui contribue à réduire l'attraction du centre sous l'équateur, comparativement à celle qui a lieu près des pôles : c'est la force centrifuge, non-seulement plus puissante, mais aussi d'une opposition plus *directe* à l'équateur que près des pôles, etc. ; mais l'auteur n'en parle pas ici parce qu'elle importe peu au compositeur de l'Horloge ; cependant, comme thèse générale de physique, il nous a paru convenable d'en prévenir.

1553. « La gravité étant la même pour nous dans un même pays et à une même hauteur, les durées des oscillations sont *directement* comme les racines carrées des longueurs, car la longueur du pendule à secondes étant, comme on sait, 4 fois celle du pendule à demi-seconde et la racine carrée de 4 étant 2, moitié de 4, la durée d'oscillation de ce court pendule n'est aussi que la moitié d'une seconde.

1554. « Les longueurs sont entre elles comme les carrés des temps. Ainsi, en considérant que l'oscillation du pendule à demi-seconde (de 9 pouces 2 lignes 57/400es) a pour temps ou durée 2 quarts de seconde (exprimés ainsi pour le calcul du carré), et le carré de 2 quarts étant 4 quarts, il faut aussi 4 fois la longueur du pendule à demi-seconde pour former la longueur du pendule à secondes (ou à 4 quarts de seconde), qui est en effet de 36 pouces, 8 lignes, 57.

1555. « Les nombres d'oscillations faites dans un même espace de temps sont en raison *inverse* ou *réciproque* des *racines* des longueurs, » c'est-à-dire d'autant plus fréquentes que la longueur de leur pendule est moindre. En effet, trouvant par le calcul que la racine carrée de la longueur du pendule à demi-seconde n'est que la moitié de la racine carrée de la longueur du pendule à secondes, c'est-à-dire que la 1re est à la 2e comme 1 : 2, on trouve aussi, inversement, que le nombre d'oscillations du pendule à demi-seconde est double du nombre d'oscillations du pendule à secondes, ou dans le rapport inverse de 2 : 1.

1556. « Ainsi, les longueurs sont en raison *réciproque* (ou inverse) des carrés des nombres d'oscillations ; c'est-à-dire que, si deux pendules font, l'un une oscillation dans

une seconde et l'autre deux, la longueur de celui-ci sera 4 fois moindre (1/4) que celle du premier, ou de celui qui ne fait qu'une oscillation en une seconde (ces propositions sont représentées par l'auteur en diverses manières, pour que le lecteur en soit mieux pénétré; les redites peuvent être utiles à des lecteurs peu habitués).

1557. La table des longueurs du pendule (celle que l'on trouve à la fin du 1er vol. du présent traité) a été calculée sur ce principe par madame Lepaute, sous la direction de M. *de Lalande*, au moyen des logarithmes, et présente pour tous les nombres d'oscillations la longueur correspondante du pendule, de sorte que, lorsqu'on a un mouvement de pendule dont la dernière roue (celle d'échappement) doit faire un certain nombre de tours par heure, et avoir par suite un nombre déterminé d'oscillations par heure, on trouve dans cette table quelle longueur du pendule on doit y appliquer, de même que, si l'on a un pendule d'une longueur donnée, on y trouve le nombre de tours de la roue ou celui des dents qui doivent passer à l'échappement en une heure de temps.

1558. « On trouva sur le même principe que, pour faire avancer une Horloge astronomique à grandes secondes d'une minute par jour, il faut raccourcir son pendule de 0 ligne 6116 (6116/10000), c'est-à-dire d'environ 6/10 de ligne ; et pour une seconde par jour, de 0 ligne 01 (1/100 de ligne), approximativement (1).

(1) L'auteur que nous suivons pense, avec quelques autres géomètres, à l'égard de la résistance de l'air, que « la durée de la demi-oscillation descendante en est un peu augmentée, mais que la durée « de la demi-oscillation ascendante en est diminuée d'autant, le tout assez approximatif pour qu'il n'y « ait pas de correction sensible à faire. Il ajoute que les calculs dont il vient de parler ne sauraient « se faire commodément, à moins qu'on ne connaisse bien la nature et l'usage des *logarithmes* et des « fractions décimales ; celles-ci se traitant absolument comme les nombres ordinaires : par exemple, « 5 lignes ,32 signifie 5 lignes et 32/100es, ou en tout 532/100es. Si l'on voulait, dit-il, multiplier « et ensuite diviser cette quantité par une autre, on réduirait aussi cette autre en 100es, et l'on ferait « l'opération comme si c'étaient des nombres entiers ; en se souvenant seulement à la fin de l'opé- « ration que ce sont des 100es et non pas des unités dont il s'agit. Mais s'il n'y a qu'une seule mul- « tiplication ou une seule division à faire, il faudra faire attention à ce qui en doit provenir : par « exemple, des 100es multipliés par des 10es donnent évidemment des 1000es, puisque si vous pre- « niez la 10e partie d'un 100e ou la 100e partie d'un 10e vous auriez un 1000e, et ainsi des autres. *La « virgule à droite des fractions décimales indique au dénominateur un chiffre de plus qu'au « numérateur.*

« Comme il y a nécessairement dans une Horloge astronomique, ou autre, une roue pour les heures « et une pour les minutes, dont on ne saurait changer les révolutions, et que l'on sait combien doit « durer la révolution de la dernière roue, et combien le pendule doit faire d'oscillations par heure, « on trouvera sa longueur en consultant la table (celle qui est à la fin de notre premier volume). Par « exemple, si la dernière roue doit tourner en une demi-minute et n'a que 25 dents, chaque dent agis- « sant sur les deux bras de l'échappement doit produire deux oscillations. Il y aura alors 6000 oscil- « lations par heure, à quoi répond dans la table, 13 pouces 2 lignes 60/100es ou 3/5es. Mais si l'on « a un pendule de longueur donnée, et que l'on veuille l'appliquer à un rouage déjà fait, il faut « observer que la chose est impossible directement, si la longueur du pendule est telle qu'il en « résulte un nombre rompu ou impair, ou enfin un nombre qui suppose trop ou trop peu de dents « à la roue d'échappement; si au contraire la question est soluble, on la résoudra au moyen de la « table et d'une partie proportionnelle (entre les deux nombres d'oscillations qui en approchent le « plus). Ainsi, pour un pendule de 18 pouces 8 lignes ,84 la roue d'échappement devra avoir « 21 dents. Si le pendule était d'environ 27 pieds 1/2 (comme il y en a eu de ce temps), ne pouvant « faire que 1200 oscillations par heure, il est clair que la roue d'échappement ne pourrait avoir que

1559. « Jusqu'ici nous n'avons parlé que du pendule simple (théorique), mais, comme il n'existe point dans la nature (ainsi qu'il est dit plus haut), et qu'au contraire tous les pendules dont on se sert ont leur pesanteur distribuée sur les différents points de leur longueur, il est nécessaire de les réduire à des pendules simples. » (C'est ce qui a eu lieu pour dresser la table mentionnée ci-dessus, et ce qu'il est utile de savoir, parce qu'en s'en servant, il convient de laisser toujours un peu plus de longueur à ces mesures du pendule, sauf à en remonter un peu la lentille au besoin. Nous allons continuer de rapporter les autres articles du même auteur, quoiqu'ils soient très-développés, et que l'on puisse se contenter de la table indiquée ; mais nous poursuivons la théorie raisonnée de ce sujet, pour ceux qui aiment à se rendre compte des règles établies, ou qui, capables d'innover avec succès dans leurs compositions, désirent prendre cette théorie pour guide.)

1560. « Je suppose, continue Lalande, un pendule SC, fig. 9, chargé non plus d'un seul poids, mais de deux tels que AC ou d'un plus grand nombre, de manière que chacun de ces poids soit considéré comme réduit à un seul point mathématique ; on comprend bien que ce nouveau pendule fera ses oscillations plus promptement que s'il n'y avait qu'un seul poids en C, parce que le poids A tend à faire ses oscillations avec la même vitesse que si le pendule n'avait que la longueur SA, beaucoup plus courte que celle SC, mais le pendule SA est aussi retardé en partie par le pendule SC, qui ne pourrait osciller seul qu'avec la lenteur produite par la longueur SC ; celui-ci, de son côté, est aussi accéléré en partie par la vitesse en tendance du pendule SA. Ainsi, ce pendule composé ne sera isochrone ni avec le pendule SC chargé du seul poids C, ni avec le pendule SA chargé du seul poids A ; mais sa vitesse tiendra un milieu quelconque entre les deux autres, et il sera isochrone avec un autre pendule simple moyen, comme serait SD, encore indéterminé, et dont il reste à chercher la vraie longueur.

1561. « Le point D encore à trouver se nomme le *centre d'oscillation* ou le *centre de percussion* du pendule composé ; ainsi le centre d'oscillation vers D sera le point dans lequel on pourrait rassembler toute la pesanteur du corps qui oscille, sans changer le temps ou la durée de ses oscillations.

1562. « Quelques auteurs l'ont nommé sous ce rapport *centre de percussion*, parce que c'est celui où se réunit tout l'effort, où la percussion serait la plus forte, où toutes les parties supérieures et inférieures appuieraient comme en équilibre, si on arrêtait le pendule par ce point-là. Une règle de fer, par exemple, ayant son centre de percussion aux deux tiers de sa longueur, ce serait par ce point qu'elle devrait frapper sur un clou pour y produire le plus d'effet ; car tous les poids AC, etc., ou autres points de la règle ou de la ligne SC, supposée inflexible, sont unis ensemble et ne peuvent se mouvoir l'un

« 5 dents. Si on voulait lui en donner 10, et la faire tourner en une minute, il faudrait changer les « nombres de cette partie du rouage : comme diminuer de moitié le nombre des dents de la roue « de longue tige, ou diminuer le nombre de la petite moyenne, ou augmenter les pignons, ou « faire marquer les minutes par renvoi, ou diviser le cadran en 120 parties au lieu de 60 ; mais ce « ne sont ici que des propositions propres à faire apercevoir la méthode et les procédés de ces petits « calculs, que l'on peut varier suivant les circonstances. » Extrait de M. de Lalande.

sans l'autre, et chacun d'eux distribuera son effort et le communiquera à tous les autres, à proportion des masses et de leurs distances à l'axe de suspension S.

1563. « Ainsi, la vitesse du corps entier en un point vers D tiendra pour ainsi dire un milieu entre les vitesses que ses différentes parties affecteraient séparément ; en sorte que dans tout autre point qui serait plus bas que D, les parties supérieures vers A agiraient plus que les inférieures, et dans tout point plus haut que ce centre d'oscillation ou de percussion, les parties inférieures vers C agiraient plus que les premières ; le centre d'oscillation est donc le seul point sur lequel toutes les parties agissent également pendant l'oscillation du pendule.

1564. « Pour trouver ce centre d'oscillation D, « il faut multiplier chacun des poids « par le *carré* de sa distance au point S et additionner tous leurs produits ensemble ; « additionner aussi ensemble les produits de chaque poids par sa *simple* distance au point « S, et enfin diviser la première somme des premiers produits par cette seconde somme « des seconds produits, et le quotient sera la longueur cherchée S D. » *Ces articles n'exigent que les premières notions de calcul et de géométrie.*

1565. « Si, au lieu de ne supposer que deux poids ou deux points pesants A C, on suspend une sphère ou corps quelconque qui ait un certain diamètre tel que A C, fig. 11, au lieu de deux poids on en aura une infinité, parce que chaque point du corps A C a sa pesanteur, et il n'y aura plus que le calcul *intégral*, c'est-à-dire les méthodes de la plus haute géométrie, le dernier effort de l'esprit humain qui puissent, en calculant l'infini et l'infiniment petit, exprimer, dans tous les cas, le centre d'oscillation de ce nombre infini de corps (ou de points) pesants ; nous en donnerons cependant le résultat ci-après.

1566. « Les questions des centres d'oscillation furent proposées à tous les géomètres vers l'an 1650, par le *P. Mersenne*. M. Huyghens n'avait alors que vingt et un ans ; il s'exerça, aussi bien que *Descartes* et le *P. Fabri*, sur quelques cas des plus simples, et ils réussirent dans plusieurs ; mais ce ne fut qu'en 1673 que M. Huyghens publia, dans son beau traité *de Horologio oscillatorio*, le fruit des plus profondes recherches dans ce genre ; et les démonstrations synthétiques qu'il donne de ses propositions sont si compliquées, qu'on sent évidemment qu'il nous a caché l'analyse par laquelle il y était parvenu ; mais les nouvelles découvertes faites depuis dans l'analyse y ont suppléé.

1567. « Je suppose une sphère A C, fig. 11, dont le centre est en K, suspendue et balancée par un point A de sa surface ; ses vibrations se feront en même temps que celles d'un pendule simple qui aurait une longueur A O égale à 7/10es du diamètre A C, c'est-à-dire que le centre d'oscillation ou de percussion O sera dans la verticale, au-dessous du centre K, d'une quantité K O égale à 2/10es du diamètre ou à 2/5es du rayon K C ; si la sphère a 10 pouces de diamètre, le centre d'oscillation sera plus bas de 2 pouces que le centre de gravité.

1568. « Si cette même sphère est suspendue par une ligne sans pesanteur à un point éloigné de sa surface, en S, figure 11, ses oscillations deviendront plus lentes ; le centre O d'oscillation remontera et se rapprochera du centre de gravité K, dans la même proportion que la distance K S augmentera ; pour savoir alors de combien il en sera éloigné,

il faudra faire cette règle de trois : « la distance S K du centre de suspension au centre de « la sphère est au rayon A K de la sphère, comme 2/5es de ce rayon : (est à) un 4e terme « qui sera la nouvelle distance K O du centre de gravité au centre d'oscillation. »

1569. « De là il suit que, si l'on diminue de moitié le diamètre de la sphère, la distance K O ne sera plus que le quart de ce qu'elle était, c'est-à-dire que la distance du centre de gravité au centre d'oscillation diminuera comme le carré du diamètre.

« On pourra demander maintenant quel sera le centre d'oscillation de la même sphère, si l'on suppose que le fil ou la ligne de suspension S A, quoique fort mince, ait une certaine pesanteur supposée connue ; voici la règle que l'on doit suivre :

1570. « Ajoutez un tiers du poids de la ligne S A avec deux 5es du poids de la sphère et multipliez le tout par le carré du rayon ou demi-diamètre de la sphère ; multipliez ensuite un 6e du poids de la ligne par la distance K S du centre de gravité au centre de suspension, et par S C, distance du point de suspension à l'extrémité inférieure de la sphère ; ôtez ce second produit du premier, et la différence sera un *dividende* que vous noterez à part ; pour avoir le *diviseur*, il faut ajouter la moitié du poids de la ligne avec le poids de la sphère, et multiplier la somme par S K ; multiplier aussi la moitié du poids de la ligne par le demi-diamètre de la sphère, et ôter ce produit du précédent, ce qui donnera le *diviseur ;* enfin le dividende étant divisé par le diviseur, le quotient sera la quantité cherchée K O.

« On emploie surtout cette règle dans le cas où il s'agit de déterminer la longueur du pendule simple (théorique) qui bat les secondes, à Paris, comme l'a fait M. *de Mairan.*» (V. *les Mémoires de l'Académie*, année 1735.)

1571. L'auteur que nous suivons donne ensuite la construction la plus approchée de ce pendule simple, que nous ne répétons pas ici, parce que nous en avons déjà donné, en tête de ces articles, une équivalente et suffisamment approximative (1543) ; mais, si l'on veut connaître la méthode la plus exacte employée jusqu'ici pour fixer la longueur du pendule théorique, on pourra consulter le recueil des opérations employées à prolonger l'arc du méridien de France en Espagne, pour la dernière mesure de la terre, exécutée par ordre de l'Académie, etc. ; mais ici le moyen déjà donné suffit.

1572. « Je suppose, dit l'auteur, un cylindre A R X, fig. 12, qui se balance autour d'un diamètre A R de son plan supérieur (comme axe de suspension) et dont on cherche le centre d'oscillation vers E ; si ce cylindre était infiniment mince et réduit à une seule ligne sans pesanteur K X, son centre d'oscillation serait en E, ou aux deux tiers de la ligne K X (suivant Newton).

1573. « Mais, si le cylindre a un diamètre comme A R, il faudra faire la proportion suivante :

« Le double de la hauteur K X est au rayon K R, comme ce même rayon K R est à « une quatrième ligne qu'il faudra ajouter aux 2/3 de K X pour avoir la longueur K E du « pendule simple isochrone au cylindre A R X. »

« On va voir l'usage de cette proportion dans le cas où l'on emploie dans les pen-

dules un canon plein, en métal, pour suspendre la lentille, ainsi que plusieurs l'ont pratiqué, afin de remédier à la dilatation dans le pendule.

1574. « Je suppose, par exemple, pour ne pas compliquer les difficultés, que l'on ait tout à la fois une sphère et un cylindre comme fig. 12 (qui n'est nullement ici dans les proportions, mais peut servir, à ces fausses proportions près), et qui doivent osciller autour du diamètre ou axe A R, dans un plan perpendiculaire à celui du dessin de cette figure. On demande le centre d'oscillation de ce pendule composé d'un cylindre et d'une sphère ; le point D est le centre de *gravité* du cylindre considéré seul ; le point O est le centre d'*oscillation* de la sphère aussi considérée seule. On multipliera K E par K D et par le poids du cylindre ; on ajoutera ce produit à celui de K O, multiplié par K C et par le poids de la sphère, et l'on aura le *dividende;* pour avoir le *diviseur* on multipliera le poids du cylindre par K D, et on l'ajoutera au produit du poids de la sphère par K C. On divisera le dividende par le diviseur, et le quotient sera la distance du point K au centre d'oscillation cherché et commun à la sphère et au cylindre. En appelant C et S les masses du cylindre et de la sphère, cela se réduit à l'expression :

$$\frac{KE \times KD \times C + KO \times KC \times S}{KD \times C + KC \times S}$$

1575. L'auteur passe ensuite à la recherche du centre d'oscillation d'une *lentille* considérée séparément, en place de la sphère supposée jusqu'ici, et la donne comme inédite et provenant du savant *Clairaut;* mais son calcul très-compliqué n'étant pas à la portée de la plupart des artistes, nous renvoyons ceux qui peuvent le suivre au chapitre de M. de Lalande, page 295 de Lepaute, outre que nous allons bientôt remplacer ces calculs, sujets à erreur chez ceux à qui ils ne sont pas familiers, par une méthode pratique facile, exacte et plus prompte. Nous nous bornerons donc ici à l'article textuel de de Lalande, qui termine ce sujet ainsi qu'il suit :

« Nous allons, continue de Lalande, appliquer le précepte du paragraphe 1574 ci-dessus à un pendule composé d'une lentille et d'un canon de métal, tel que celui K G (fig. 12 quoique *disproportionnée*). Pour cela je suppose la même lentille de l'article précédent (de *Clairaut*, de 7 pouces 2 lignes de diamètre et de 13 lignes d'épaisseur), et un cylindre ou tige de même métal qui ait 8 lignes de diamètre, et de hauteur 33 pouces 1 ligne, 07, suspendu par le centre de sa base supérieure; la distance K E de son centre d'oscillation sera de 22 pouces 0 ligne, 730, la solidité du cylindre 19958, 96 lignes cubiques; celle de la lentille 38485, 90 lignes cubiques (on pourrait se contenter de les peser séparément, au lieu de calculer les solidités comme je viens de le faire); la distance K C du centre de gravité de la lentille 440 lig., 57, la distance K O de son centre d'oscillation 441 lig., 99, ainsi $\frac{KE \times KD \times C}{KD \times C + KC \times S}$ = 50 lig., 15; et $\frac{KO \times KC \times S}{KD \times C + KC \times S}$ = 358 lignes, 26; donc les deux ensemble feront 408 lig., 41; c'est la distance K Y du centre d'oscillation du pendule composé de la lentille et du cylindre : par conséquent le centre d'oscillation Y sera au-dessus du centre C de la len-

tille de 32 lig., 16. » Nous sommes forcé de rapporter ces formules de l'auteur pour compléter son sujet.

1576. Nota. Nous prévenons que dans l'exécution la verge de ce pendule devra toujours, *pour sûreté,* être tenue plus longue de 3 à 4 pouces que celle du calcul, afin de ne la raccourcir à sa vraie longueur usuelle que par l'expérience de la marche, comme nous l'exposerons plus loin, *ce qui préservera de toute erreur.*

1577. Le même auteur ajoute ailleurs ce qui suit : « Ce que l'on a vu de la durée et de l'isochronisme des petites oscillations du pendule suppose des arcs infiniment petits, car, si ces arcs sont seulement de 2 pouces, le pendule pourra retarder d'environ 6 secondes par jour.

1578. « D'après un principe démontré, le temps ou la durée d'une oscillation augmente, par l'étendue des arcs, de sa huitième partie multipliée par le *sinus-verse* ou hauteur de l'arc. »

1579. M. de Lalande propose ensuite des petits arcs de 0°.... 15', ou 1/4 de degré d'étendue, de chaque côté, que l'on pratiquait de son temps ; mais alors il faut augmenter beaucoup le poids de la lentille pour en rétablir la puissance ou force de mouvement, et ce poids, devenant trop considérable, fatigue la suspension, même celle à ressorts, et affaisse les verges de compensation. On employait, à cette époque, et avec ces petits arcs, des lentilles de 40 à 60 livres et plus, suspendues à couteau, mais dont le mouvement s'arrêtait au moindre ébranlement de l'édifice ; outre que l'angle du couteau ne résistait pas longtemps à cette pression. Les pendules les plus lourds que l'on se permette aujourd'hui ont une lentille de 10 à 15 livres, avec verges compensatrices à gril de 5 à 10 livres, y compris les détails de leur monture, le tout produisant 15 à 25 livres avec suspension à ressorts ; c'est une limite que l'on ne dépasse plus maintenant, et que des auteurs habiles réduisent même à moins de 15 livres en tout, avec des arcs de 3° à 4° ; nous reprendrons bientôt ce sujet.

1580. La table suivante, d'après de Lalande, indique en degrés, ou en lignes équivalentes, avec fractions décimales, le retard naturel en 24 heures du pendule à secondes, suivant l'étendue des arcs décrits de chaque côté de la verticale.

0 degrés.	1' . . 0''	équivalant à 0 lignes	,128.	retard en 24 h. 0''	,0004
0	15 . . 0	. . . . 1 . . .	,921.	0	,103
0	30 . . 0	. . . . 3 . . .	,843.	0	,412
1	0 . . 0	. . . . 7 . . .	,686.	1	,647
2	0 . . 0	. . . . 15 . . .	,372.	6	,588
3	0 . . 0	. . . . 23 . . .	,059.	14	,796
4	0 . . 0	. . . . 30 . . .	,745.	26	,362
5	0 . . 0	. . . . 38 . . .	,452.	41	,148

S'il était possible d'exécuter un échappement qui permît un arc d'une seule seconde de degré, ou de 0 de ligne ,002, le retard, dit l'auteur, ne serait que d'une seconde en 21500 ans ; mais cette observation n'est ici que de pure curiosité, comme les quatre premières lignes de cette table qui, dans les constructions actuelles, n'offrent pas une

étendue d'arc suffisante pour l'échappement ; on conçoit aussi que ces mesures théoriques assujetties à l'échappement, aux engrenages, et à l'état de l'huile, ainsi que l'amplitude des arcs, ne sont ici qu'une approximation, et qu'il faut les expérimenter d'après l'état de chaque pendule.

1581. La résistance de l'air, proportionnelle à son poids variable, contribue aussi à retarder les oscillations; mais, d'après les expériences et calculs de feu M. Bessel, cet effet est tellement minime, qu'on peut le négliger sans crainte, surtout si la boîte de l'Horloge astronomique est vaste et large, ce qui vaut toujours mieux, et si on ne l'ouvre pas souvent. Nous traiterons plus loin de l'effet considérable de la température sur les verges des pendules.

1582. Quant à la force centrifuge dont il a été question dans les articles précédents, il paraît que c'est *Huyghens* qui a démontré et calculé le premier combien le mouvement de rotation rapide de la terre diminue la pesanteur qui, pour un même volume de matière, est comme il a été déjà dit, moindre sous l'équateur que près des pôles, et c'est aussi ce que les expériences du pendule ont confirmé.

1583. Nous avons dit à la fin de l'article 1572 qu'une ligne simple, théorique, étant supposée suspendue par une de ses extrémités, la *Nature* et *Newton* en ont fixé le centre d'oscillation aux deux tiers de sa longueur, il en résulte une propriété remarquable du centre d'oscillation à l'égard de l'axe de suspension, qui paraît se conserver à très-peu près dans une simple règle droite et bien égale, de matière pesante et homogène, telle qu'est supposée celle de la fig. 13, pl. XLVI. Si l'on pratique à l'un des bouts A de la règle, d'abord trop longue comme de 5 pieds, un axe de suspension à couteau, ayant son angle centré juste au milieu du bord de l'extrémité de cette règle, et disposé de manière à ne pas influer sur ses oscillations, on aura un pendule simple sans lentille; en raccourcissant la règle peu à peu, la seule expérience l'amènera aisément à battre juste la seconde de temps. Alors le centre d'oscillation de la règle sera en O, aux deux tiers de sa longueur restée, à partir de l'axe de suspension. Ce point étant déterminé et bien marqué, sera à 36 pouces 8 lignes ,57 de l'axe de suspension. Maintenant, si l'on transpose l'axe de suspension (construit en conséquence), sur le point O, en renversant le couteau et la règle, son nouveau centre d'oscillation coïncidera avec l'extrémité qui servait à la suspension, et ce nouveau pendule, quoique très-raccourci du bas, battra encore des oscillations d'une seconde, car le tiers O P de la règle qui s'élèvera alors au-dessus de l'axe de suspension compensera, par son inertie, en position toujours opposée aux deux tiers restants du bas de la règle, l'accélération naturelle de la partie inférieure raccourcie d'un tiers. Le moyen d'y parvenir est de placer au bout de la règle une boîte avec couteau de suspension en dehors, et divisé en deux parties dont l'angle coïncidera avec l'extrémité de la règle, et de disposer le tout en sorte que la boîte, seule sur son couteau, fasse d'elle-même des oscillations d'une seconde : alors elle n'influera pas sur les oscillations de la règle; ce moyen habile a été employé pour le pendule libre qui a servi à la dernière mesure d'un degré du méridien, comme on peut le voir dans le rapport publié par l'Académie sur ce sujet.

1584. Il y aura alors nécessairement, entre le nouvel axe de suspension et son centre d'oscillation coïncidant avec l'extrémité de la règle, la même distance qu'au premier pendule qu'elle formait précédemment. Il en sera de même, en quelque point de la règle que la distance essentielle voulue soit transportée, lors même que le tiers restant de la règle serait divisé et inégalement réparti, soit au-dessus, soit au-dessous, en tout ou en partie, au delà de la distance conservée entre l'axe de suspension et le centre d'oscillation.

Quelques-uns ont cru y trouver un nouveau moyen de vérifier la longueur du pendule à secondes, mais ce moyen pourrait manquer d'exactitude, parce que la matière d'une telle règle ne peut être parfaitement homogène ni approcher autant de cette condition qu'un fil métallique très-délié employé à former un pendule simple, et qui, dans le cas d'imperfection de la matière, ne comporterait pas à beaucoup près autant de différence. Un autre motif, c'est qu'il faudrait encore se procurer ce pendule simple pour vérifier le centre d'oscillation de la règle, etc. Il y a d'ailleurs la largeur de la règle qui doit entrer dans ces considérations, et l'examen de son effet exigerait une analyse mathématique que nous ne savons pas avoir été développée par ceux qui ont traité ce sujet (sauf l'article ci-dessus 1570) ; or il en résulte, en général, que le centre d'oscillation peut se trouver parfois placé au delà de sa lentille et sans en prolonger la verge ; c'est-à-dire que la longueur *virtuelle* du pendule à secondes peut ne pas dépendre de la dimension ordinaire établie ; enfin que l'on peut exécuter un pendule à seconde entière, et très-court, moyennant le retard produit par une partie qui dépasse en haut l'axe de suspension ; mais, vu qu'il paraît en résulter un effet désavantageux comme puissance et inertie, c'est une question à soumettre à l'analyse mathématique pour en apprécier les avantages ou les inconvénients. Un *principe mathématique* peut être vrai sans que son application convienne à l'Horlogerie, lorsqu'il n'y remplit pas *d'autres conditions nécessaires.*

C'est sous un pareil point de vue qu'a été disposé l'instrument moderne de M. *Maëlzel*, et qui porte le nom de *Métronome*, le plus simple et le plus ingénieux que l'on connaisse pour marquer les temps de la mesure musicale, laquelle n'exige pas, du reste, autant de précision que la mesure physico-mathématique du temps. Le but du métronome n'est pas de régler toute la marche d'une pièce de musique, qui peut nécessiter en certains moments plus ou moins de vitesse pour l'expression, suivant quelques-uns, car ce n'est pas l'avis de tous, mais de fixer le mouvement des premières mesures, au moyen du numéro désigné de la tige de son pendule, dont la lentille mobile devient une sorte de *curseur*. Ce moyen simple d'un auteur instruit est aussi économique que ceux tâtonnés des ignorants ont été chers et compliqués.

RECHERCHES ULTÉRIEURES CONCERNANT LE PENDULE.

1585. D'autres recherches pourraient encore éclairer l'emploi du pendule, comme celles qui tendraient à examiner si les parties latérales de la lentille et du système en-

tier, lorsqu'elles n'arrivent point à la verticale dans les petits arcs, contribuent à la puissance du pendule ou à son inertie, et ce qui peut en résulter comme effet sur les oscillations et comme régularité. On vient d'éprouver assez récemment avec succès, à l'Observatoire de Paris, l'avantage raisonné des ressorts de suspension en faveur de l'isochronisme, dans une latitude d'étendue d'arc que l'instrument n'est pas censé devoir dépasser; on a même calculé la résistance de l'air, toutes observations qui, avec un échappement convenable, peuvent contribuer puissamment à la régularité de l'Horloge astronomique. Quand on aura obtenu par tous ces moyens et d'autres mieux connus, ou trop rarement appliqués avec tous les soins possibles, toute la régularité espérable, il pourra rester encore à rechercher quelle peut être, sur les oscillations, l'influence de la situation changeante des deux *corps célestes* qui altèrent le plus la pesanteur des masses à la surface de la terre, soit dans leurs conjonctions, soit dans leurs oppositions, ou dans leurs autres positions diverses, et qui agissent si fortement sur les mers et sur notre atmosphère, ce qui pourra alors donner lieu à des tables de correction du mouvement du pendule, etc.

1586. Les diverses remarques ci-dessus, relatives à un poids *curseur* ou masse quelconque placée sur la tringle du pendule au-dessus de sa lentille et susceptible de déplacement, nous rappellent la promesse de quelques développements concernant le *curseur* de *Huyghens*, dont les effets suivent une progression singulière, et que nous avons cités, page 81 de l'introduction de notre tome Ier. Nous avons dit alors que les causes de cette espèce de phénomène ne pouvaient être expliquées complétement que par le calcul même donné par l'auteur, trop peu à la portée des artistes, et sortant du genre de notre ouvrage : nous nous bornerons donc à ce sujet à l'observation suivante : c'est que les effets combinés de deux causes de progressions différentes et opposées occasionnent souvent des séries de termes qui atteignent alternativement un *maximum* et un *minimum*, très-connus en mathématiques comme en physique. En ce sens, l'on peut déjà remarquer ici, pour exemple de simple analogie, et non comme explication directe, que le poids curseur a sa progression d'accélération *croissante* suivant la loi du carré des *longueurs*, tandis que son action sur la vitesse de la lentille est en progression *décroissante* et suivant la loi du levier de troisième espèce; que la combinaison de ces valeurs a son calcul particulier, et que des effets analogues peuvent même se déduire du calcul de de Lalande (1570 et suite). Mais, comme les quantités de ce calcul dépendent de la pesanteur des parties tant fixes que mobiles de chaque pendule, il est plus court et plus sûr pour la pratique de se faire, au moyen de quelques épreuves, une table de la quantité d'avance produite par le curseur, pour des espaces égaux parcourus, où, si on le préfère, une table des espaces inégaux à parcourir pour des accélérations égales en temps (pour des pendules de même construction), comme l'a fait *Huyghens* pour le sien ; mais ses proportions étant fort différentes de celles que l'on pratique aujourd'hui, nous laisserons là sa table, qui ne pourrait s'y appliquer. On s'apercevra aisément que pour des espaces égaux d'élévation du curseur, à partir de la lentille, par exemple, les quantités d'accélération iraient en diminuant jusqu'un peu plus haut que le milieu du

pendule, où elles se réduisent à zéro ; aussi est-ce vers ce point milieu que se trouve établi le mécanisme d'encliquetage en *b* qui sert à relever ou abaisser le curseur, fig. 5, pl. XLVI, comme étant le point que celui-ci ne doit pas dépasser dans cette composition (1). V. *la table de Huyghens*, t. Ier, pl. II, fig. 4.

1587. Nous saisirons aussi cette occasion de dire ici quelques mots sur le pendule parabolique de Huyghens cité page 83 et suite du tome Ier, où l'on voit que le mouvement de ce pendule, au lieu d'être oscillatoire, est *circulaire continu* dans le même sens. Dans cette construction, l'index au bas du pendule décrit continûment des cercles entiers, susceptibles d'augmentation ou de diminution dans leur diamètre, suivant les inégalités de la force motrice, et qui peuvent en compenser la durée, même approcher de l'isochronisme exact, si l'augmentation du rayon du cercle décrit suit les rapports des *ordonnées* d'une *parabole*, d'où lui vient le nom distinctif de *pendule parabolique*. Cette propriété pourrait être très-approchée par une suspension combinée. Huyghens, à l'époque de cette invention, dont Berthoud fait l'éloge, suspendait son pendule par un double cordon de soie à branches fort divergentes, qui s'appliquaient sur une lame courbée en *parabole;* mais ce moyen, vrai en principe et défectueux dans son mode d'application, a été supprimé comme ses courbes cycloïdales, et pour le même motif; on y a substitué une double suspension sur deux couteaux croisés à angle droit, et séparés par un disque d'acier, ayant deux gouttières opposées, dessus et dessous, avec leur fond dans le plan du centre de mouvement des couteaux, évidés l'un et l'autre au milieu, pour qu'ils ne se touchent pas ; ce qui forme toujours une suspension de *Cardan*, etc. En ne faisant décrire alors à ce pendule que de petits cercles (comme on a réduit le pendule oscillatoire à de petits arcs), on obtient de cette construction assez de régularité pour l'usage civil. La longueur virtuelle de ce pendule ne doit être que d'environ 18 pouces, moitié du pendule ordinaire, pour que chaque cercle ait la durée

(1) Ferdinand Berthoud, assez instruit pour traduire l'original latin d'Huyghens, n'a dit que peu de mots du *curseur* dans son *Histoire de la mesure du temps*, et semble avoir voulu se réserver cette méthode qu'il appliqua en effet à plusieurs Horloges astronomiques. Un régulateur de ce genre ayant été demandé à un autre artiste de Paris, fort renommé, celui-ci crut qu'il ne s'agissait que de l'application vulgaire d'un petit poids au-dessous de la lentille, et que l'on peut déplacer de légères quantités pour le réglage. Mais, en employant le curseur, un ouvrier s'aperçut avec étonnement que, vers la moitié du pendule, cette petite lentille ne produisait plus d'effet, et même qu'au delà elle semblait détruire ce qu'elle avait produit. On crut à une erreur; mais de nouveaux essais confirmèrent ce résultat; on consulta un savant, qui y fut d'abord trompé lui-même, mais qui, sur la preuve évidente, en chercha la cause physico-mathématique; la solution, à l'aide d'une hyperbole apollonienne, en fut insérée dans la *Connaissance des temps* pour 1817, comme celle d'une découverte faite dans les ateliers de l'artiste. Ce livre nous étant parvenu en province, où nous nous trouvions alors, nous fûmes surpris, non pas que l'artiste ignorât l'ouvrage latin de Huyghens, puisqu'il ne pouvait pas même lire avec fruit les ouvrages français sur son art, mais bien que le savant ne fût pas au courant des travaux de l'ancien géomètre. Étant alors en correspondance avec l'artiste, nous lui adressâmes la traduction entière de la solution d'Huyghens, pour la transmettre à celui qui était en état de l'entendre (nous en avons encore la copie). L'artiste se trouva fort désappointé d'avoir publié comme une découverte un fait connu, et de n'avoir annoncé que son ignorance d'une construction ancienne renouvelée de son temps par un contemporain habitant la même ville. Alors, au lieu de faire retentir la prétendue découverte, on garda un *silence prudent*, afin qu'il n'en fût plus question.

d'une seconde. La lentille y est posée horizontalement ; le mouvement circulaire y est entretenu par un bras de manivelle pourvu d'une coulisse oblongue, pour permettre l'amplitude accidentelle des cercles, et ce bras est fixé à une tige de pignon auquel aboutit le rouage et qui lui tient lieu d'échappement (1). Pour en dire plus, il faudrait des figures, mais l'intelligence mécanique y suppléera ; car, vu qu'il n'y a ni repos ni chute, l'emploi de ce moyen convient mieux à l'alcôve d'un malade qu'aux observations astronomiques, où l'on préfère que les secondes aient un temps d'arrêt et fassent même entendre un léger bruit ; si nous disons un léger bruit, c'est parce que les artistes expérimentés savent que si le bruit d'un échappement est trop fort, c'est qu'il y a trop de chute ou trop de force motrice, ce que plusieurs s'attachent à éviter ainsi que les grandes aiguilles de secondes, à moins de quelque convenance locale. Quant au besoin des observateurs, un bon chronomètre tenu à l'oreille y pourvoit, en prenant note de sa différence d'avec le régulateur, tant avant qu'après l'observation, et s'il est à 18,000 vibrations par heure, il donne de plus les fractions des 5es de seconde, ce qui est encore plus avantageux pour la précision. Tous les artistes occupés de pièces marines savent combien il est facile de s'habituer à s'en servir, et que c'est le moyen le plus sûr et le plus exact.

1588. On voit ainsi que le pendule donné par la nature offrant les propriétés (celles du moins qui ont été explorées) les plus solides, puissantes et constantes que possède l'Horlogerie, mérite toute l'attention de la science et des artistes instruits, aujourd'hui surtout que la mesure exacte du temps est devenue importante pour l'Astronomie, la Physique générale, etc., et que nous avons dû lui consacrer ce long article, où nous avons encore à nous occuper de la meilleure suspension du pendule, des moyens préférables de compensation contre les effets de la température, et enfin de la disposition la plus parfaite actuelle de ce moyen physique, que l'on trouve ainsi plus communément employé que complétement connu.

DE LA DILATATION ET CONDENSATION DES MÉTAUX DANS LE PENDULE PAR LES DIFFÉRENCES DE TEMPÉRATURE.

1589. Il nous reste à examiner les moyens de conserver à un système quelconque de pendule, malgré l'action de la température, une longueur constante d'où dépendent principalement l'égalité de durée de ses oscillations, et par suite la régularité de la mesure du temps ; or le calorique, pénétrant tous les corps tant solides que fluides, change sensiblement leurs dimensions. La longueur trouvée du pendule simple, mais réel,

(1) C'était un pendule de cette espèce qui devait décorer le mouvement que nous avions proposé pour l'un des passages de la capitale, et que nous avions consenti à diriger. Mais des retards nous firent cesser de nous en occuper, et des gens à l'affût des occasions firent adopter en place un autre projet d'un genre ordinaire et très-commun. Le pendule parabolique eût été plus curieux. La composition est de feu M. Normand père, architecte, ancien pensionnaire de Rome, que les arts regretteront longtemps. Nous l'avons employée pour la gravure qui sert de frontispice à notre premier volume. (*Voy.* la note 2, page 84, tome Ier.)

quelle que soit sa construction, ne peut être soustraite à cette influence, à moins qu'il ne soit transformé en *pendule compensateur*, c'est-à-dire composé de manière à annuler mécaniquement ou physiquement les effets du calorique sur la longueur, et par le calorique lui-même, car la longueur est ici le sens le plus important de cette correction, qui, sur la tige d'acier du pendule simple, peut arriver en 24 heures à plus de 20 secondes de différence moyenne de l'été à l'hiver.

La première observation de ce genre à l'égard des métaux est due à *Vendelinus* vers 1650 ; ensuite Muschembroëck composa le premier *pyromètre* pour mesurer les effets du calorique. Plus tard, Ferdinand Berthoud exécuta en France la première étuve en grand avec pyromètre, pour y étudier ses pendules compensateurs qu'il y exposa successivement au froid de la glace et à la température de 35° ; il parvint à obtenir par sa construction un pendule d'une longueur invariable ; mais, comme il arrive souvent aux plus habiles, il oublia que cette condition seule était insuffisante, et qu'il fallait en même temps compenser des effets analogues dans tout l'ensemble de l'Horloge en la faisant marcher dans l'étuve avec son pendule, pour obtenir la compensation dite *absolue* ou complète, ainsi qu'on le pratique actuellement.

1590. Mais Berthoud a tiré de ses expériences une table très-utile de dilatation de divers métaux que nous avons donnée à la fin de notre premier volume, à la suite de celle de *Lavoisier* et *Laplace ;* celle de Berthoud est même plus concluante pour l'Horlogerie, en ce que, vu sa destination, les verges ou tringles du pendule y sont éprouvées sous le poids de la lentille, ce que n'ont pas fait d'autres observateurs qui ont négligé en partie de rapporter les détails circonstanciés de préparation des métaux mis en expérience, détails qui importent aux artistes pour la prévoyance des effets.

1591. La correction simultanée autant que possible des longueurs variables du pendule par les effets du calorique est opérée le plus souvent par l'emploi de verges ou tringles de métaux dont la dilatation est de quantité différente ; les unes sont, par exemple, en acier, et sont *tirées verś le bas* par le poids de la lentille, et les autres sont en laiton plus dilatable, ou en autre métal d'une dilatation encore plus forte, comme le zinc tiré à la filière, mais dans tous les cas plus grande que celle de l'acier, pourvu que le métal soit assez résistant au poids *qu'il doit remonter* à mesure que l'acier s'étend en longueur : enfin que le métal plus dilatable ne soit pas sujet à s'affaisser sur lui-même par le poids de la lentille et de tout le système du pendule. Ici l'excès de la dilatation du laiton sur celle de l'acier, *remonte* les traverses du haut de tout ce dont l'acier *s'allonge ;* le contraire a lieu par le froid, comme on le verra par les détails des diverses compositions de ce mécanisme, que nous allons exposer ; car, si l'allongement de l'acier *tiré en contre-bas* par la lentille est complétement corrigé par le laiton qui *la remonte,* on conçoit que le pendule doit conserver aussi la même distance entre son centre d'oscillation ou de percussion et son axe de suspension, et par conséquent avoir sa longueur virtuelle constante.

1592. Ferdinand Berthoud conclut de nombreuses expériences faites avec soin, et qui servent aujourd'hui de base aux combinaisons des pendules compensateurs, que

son pyromètre divisant la valeur d'une ligne de dilatation en 360 parties, une verge d'acier battu à froid de 3 pieds 2 pouces 5 lignes = 461 lignes, s'allonge en passant du froid de la glace à 27° de chaud, de 74/360, et qu'une verge de laiton de même longueur s'allonge, par le même changement de température, de 121/360 ; que le retard d'une seconde en 24 heures dans le pendule peut être produit par son allongement d'un 99e de ligne, terme moyen, et qu'il suppose être 1/100 en nombres ronds, pour la facilité du calcul, d'autant mieux que les petites quantités dont il faut tourner l'écrou de réglage ne peuvent être que d'un effet approximatif et sujet au tâtonnement inévitable dans l'usage, pour obtenir le degré possible de précision. (V. la 2e table de dilatation, qui est celle de Berthoud, rapportée à la fin du premier volume.)

Ferdinand Berthoud observe que la dilatation sous le poids d'une forte lentille ne change pas sensiblement, mais que le froid ne la raccourcit pas proportionnellement, ainsi qu'il dit l'avoir éprouvé avec une lentille du poids de 35 livres, ce qui peut provenir des frottements à vaincre, et doit engager à modérer généralement le poids du système entier du pendule. Cette remarque de Berthoud confirme la prévention de quelques-uns contre le gril, et reporterait sous ce rapport tout l'avantage à la compensation par le *mercure*.

1593. Nota. Nous avons déjà dit dans nos observations de physique générale, que peu de lecteurs auront remarquées, que le mot *froid* n'exprime point une substance, mais l'absence partielle du calorique considéré seul comme un corps réel ; que *zéro-glace* (fondante) degré uniforme dans tous les climats, a été judicieusement choisi comme point de départ, et l'eau bouillante comme terme de 80° de chaleur sous une pression moyenne du baromètre ; que l'*ignorance* seule pourrait faire choisir d'autres points, comme nous l'avons observé en note du paragraphe 1225 à l'occasion d'un thermomètre très-sensible, espèce de *château branlant*, et que l'on avait en quelque sorte dénaturé en prenant le zéro de départ sur le degré dit *tempéré*, toujours incertain suivant tous les bons auteurs sur ce sujet ; les degrés au-dessus de zéro-glace sont souvent accompagnés du signe + (plus), et ceux au-dessous, du signe — (moins).

Nous n'entrerons pas ici dans le détail des essais de compensation de *Graham* et de *Harrison'*, de 1721 à 1826 ; de Julien Leroy, en 1738 ; Deparcieux, en 1739 ; Cassini, en 1741 ; Ellicott, vers 1753 ; Ferdinand Berthoud, en 1760, etc. Nous ne citerons que le petit nombre préféré des constructions actuellement usitées, parmi lesquelles le lecteur pourra choisir.

1594. Le pendule *à gril*, attribué plus généralement à *Harrison'*, mais auquel Graham paraît avoir aussi pensé, est une construction encore souvent adoptée, et composée de la manière suivante :

La fig. 1re, pl. XLVII, proportion de demi-grandeur, représente les deux extrémités du gril de J. Harrison'. Le pendule y est formé avec 9 tringles rondes de même grosseur, tirées à la filière ou *au banc*, dont 5 sont en acier et 4 en laiton ; les deux tringles ou verges extérieures d'acier *a b*, *a b*, sont ajustées d'une manière ferme et solide en 1 et 1 au moyen de chevilles très-serrées dans les deux trous extrêmes de la traverse su-

périeure de laiton A, qu'elles affleurent en dessus. Ces deux verges d'acier, parfaitement dressées et revenues bleues après le dressage pour mieux garder par la suite leur ligne droite, doivent former un angle droit exact avec la traverse A, et rester naturellement bien parallèles, parce que la régularité du reste de la figure du gril dépend de ces deux premières verges, qui seules sont implantées solidement et sans jeu dans leur traverse du haut. L'extrémité inférieure de ces deux 1res verges d'acier est ajustée du bas dans les trous extrêmes de la traverse inférieure B, en 2 et 2; mais ici avec assez de liberté dans les trous et avec leurs chevilles tournées, pour que, en cas d'inégalité de dilatation ou de contraction de l'une de ces verges, la traverse B puisse un peu cesser au besoin d'être parallèle à celle A du haut, sans gêner ni forcer les deux premières verges dans leur ajustement inférieur, ni leur occasionner de flexion sur leur longueur; en un mot la traverse B doit pouvoir s'incliner légèrement et facilement comme le fléau d'une balance, en cas d'inégalité d'allongement des deux premières verges, ce qui n'atteint pas du reste un quart de ligne d'inclinaison.

Dans la traverse B du bas, sont de même ajustées *librement* deux tringles de laiton, en 3 et 3, qui vont soutenir dans le haut la traverse C, où elles entrent dans des trous et sont chevillées librement aussi en 4 et 4, avec même facilité, pour cette traverse, de basculer un peu et sans gêne, pour la même cause possible d'inégalité de dilatation entre les deux tringles de laiton : la même traverse C du haut est entaillée à ses deux extrémités de deux demi-trous, afin d'embrasser librement le demi-diamètre intérieur des deux premières tringles d'acier contre lesquelles elles doivent pouvoir glisser facilement; cette dernière disposition n'ayant pour but que de maintenir la traverse C et ces tringles de laiton dans le plan du gril.

Aux points 5 et 5 de la traverse C sont attachées dans leurs trous, librement aussi, deux autres tringles d'acier qui sont tirées vers le bas par la traverse D au moyen de leurs chevilles aux points 6 et 6, et avec la même liberté que les précédentes. La traverse D soutient par le même moyen, en 7 et 7, les deux dernières tringles de laiton qui, montant en 8 et 8, y supportent la traverse E du haut garnie de ses chevilles, et maintenue aussi dans le plan général par ses deux extrémités entaillées d'un demi-trou, et embrassant la demi-circonférence des deux tringles d'acier les plus voisines, comme la traverse C et aussi la traverse D du bas.

Du milieu de la traverse E descend la 5e tringle d'acier qui s'y trouve aussi chevillée librement, et qui va traverser librement aussi les deux traverses du bas D et B, mais ici sans chevilles, pour pénétrer de là jusqu'au centre de la lentille en L du pendule, où se trouve logé un écrou divisé et qui suspend la lentille à l'ensemble du gril. Ainsi le poids total *tire* les tringles d'acier et *pèse* sur celles de laiton.

1595. Nous avons fait observer que les deux premières tringles extérieures d'acier en 1 et 1 devaient être engagées et chevillées dans les trous de la traverse supérieure A d'une manière fixe, parce que leur aplomb maintient l'horizontalité essentielle de cette traverse, qui règle celle de toutes les autres percées deux à deux à la même longueur; mais l'horizontalité de ces dernières dépend ensuite du plus ou moins d'égalité de dilata-

tion de chaque couple de tringles. C'est pourquoi toutes celles-ci doivent être assez libres dans leurs trous et avec leurs chevilles, pour obéir à l'inégalité possible de dilatation qui sans cela pourrait occasionner de la gêne dans l'assemblage et le jeu ou mouvement du gril. Cette différence de dilatation, toujours minime, se compense d'une verge par l'autre correspondante, et leur effet se résoud en une quantité moyenne, par le petit mouvement de bascule qui leur est permis. C'est pour ce motif que, excepté les deux trous du haut des deux premières verges d'acier qui doivent être serrées et inébranlables dans leur ajustement 1 et 1 du haut seulement, tous les autres assemblages chevillés doivent avoir la liberté requise. Il ne s'ensuit pas que les chevilles de ceux-ci ne doivent pas tenir à frottement dans leurs trous, car alors elles pourraient en tomber ou en sortir quand on manie le gril. Mais les grands trous des traverses où pénètrent les tringles étant assez larges pour leur permettre un peu de bascule, les petits trous des mêmes traverses, pour les chevilles, doivent recevoir celles-ci à frottement dur; tandis que les petits trous correspondants des tringles doivent les y laisser tourner au besoin avec liberté. Les chevilles doivent être tournées un peu coniques et assez longues pour choisir le point où elles se gênent convenablement dans les trous des traverses, un peu moins grands que ceux des tringles, pour ne laisser qu'à celles-ci la liberté recommandée. Nous donnons ici beaucoup de développement à ces détails parce que l'effet du gril n'est souvent pas compris des ouvriers; mais ils seront superflus pour des artistes intelligents.

1596. Les traverses horizontales des extrémités du gril sont en laiton et percées d'outre en outre, et le plan général du gril est de plus maintenu par deux autres traverses percées de 9 trous libres sans cheville, sauf une à chaque bout pour les retenir sur les deux premières tringles d'acier, vers chaque tiers de la hauteur totale du gril. L'usage de ces deux traverses de précaution est de prévenir toute tendance à la flexion dans les verges de laiton, moins roides que celles d'acier. Aussi les trous de ces deux traverses doivent-ils être bien adoucis intérieurement ainsi que le dehors des verges, pour que celles-ci puissent y glisser sans résistance et même y avoir un léger ébat. Le gril tronqué ici ne permet pas de voir ces deux traverses générales.

On fixe aussi quelquefois à la traverse inférieure B et en dessous deux courts bouts d'acier de moindre diamètre que les tringles, et qui descendent bien parallèlement, pour pénétrer de quelques lignes au milieu de l'épaisseur de la lentille percée en ces points assez profondément, afin de l'empêcher de tourner quand on fait mouvoir son écrou du centre, et de la maintenir toujours dans le plan du gril; l'écrou de réglage est placé au centre de la lentille pour que la dilatation propre de celle-ci, libre dans le sens de ses rayons, n'influe pas sur la longueur totale du système.

La traverse E du haut pourra être déplacée au besoin et être arrêtée sur plusieurs autres trous des trois tringles du milieu, c'est-à-dire sur celle du centre, cinquième d'acier, et sur les deux tringles voisines de laiton. Ces autres trous de ces trois tringles sont sur une même ligne horizontale, et distants en hauteur entre eux d'environ 6 lignes; ils servent à réduire l'effet de dilatation du laiton en cas qu'il soit trop fort, ainsi qu'on le dispose toujours d'abord, en tenant la longueur du laiton autant que l'on peut

au delà de la mesure, car il arrive parfois qu'en employant toute la longueur permise du gril, il n'y a pas encore assez de longueur de laiton, surtout lorsque sa qualité accidentelle produit moins de dilatation. D'ailleurs il faut laisser entre les traverses du haut et du bas du pendule environ deux lignes d'intervalle, pour que leur déplacement par la température soit entièrement libre, ce qui raccourcit encore la longueur des tringles de laiton. Quant au déplacement de la traverse E, on a soin d'en remplir les trous avec trois chevilles à têtes molettées, pour pouvoir les retirer et les placer dans d'autres trous des trois tringles du centre. Mais, avant de faire cette opération, il faut avoir soin d'arrêter dans le bas la 5e tringle d'acier du milieu, avec une autre cheville à tête molettée tenue en réserve à part, et que l'on place dans un trou vide en B du milieu de cette traverse, correspondant à un pareil trou de la verge d'acier du milieu, pour empêcher celle-ci de glisser tout à coup en laissant descendre la lentille. Cet accident étant donc ainsi prévenu, on peut changer la hauteur de la traverse E; puis ses trois chevilles du haut étant remises à leurs nouvelles places, on retire celle du milieu de la traverse inférieure B, que l'on place en réserve sur quelque point de la boîte où elle ne gêne pas.

La traverse A du haut du gril porte en dessus et de la même pièce deux crochets qui l'assemblent avec l'axe de la mâchoire inférieure des ressorts de suspension dont nous allons bientôt nous occuper.

1597. Quand on veut exécuter un tel pendule ou tout autre, on doit d'abord en tracer l'épure de grandeur naturelle sur quelque table unie. La longueur calculée ensemble de la *totalité* des 4 tringles de laiton doit être, dans sa partie d'action, c'est-à-dire entre ses trous, à la *totalité* de longueur des 5 tringles d'acier prises de même et ensemble, comme la dilatation 74 de l'acier battu à froid ou tiré (suivre la table de Berthoud) est à la dilatation 121 du laiton; c'est-à-dire, que si l'on divise la longueur totale de l'acier en 121 parties égales, on doit trouver au moins 74 à 75 de ces mêmes parties égales (et même un peu plus) dans la longueur *totale* du laiton, qui est ici plus courte que celle *totale* de l'acier, dans la proportion *inverse* de la dilatation du laiton comparée à celle de l'acier. Comme il ne s'agit ici que de faire remonter le bas de la 5e tringle d'acier qui porte la lentille, de la quantité dont la chaleur allonge tout l'acier, on conçoit qu'il ne faut pas autant de laiton que d'acier, puisque le 1er s'allonge davantage, et que le rapport entre les longueurs de ces deux métaux doit être comme ci-dessus en sens *inverse* de leur degré naturel de dilatation. Mais comme il arrive parfois que le laiton, qui est un alliage de cuivre rosette et de zinc, est composé de manière à éprouver moins de dilatation que les verges de la table de Berthoud, on tâche de profiter pour le laiton de toute la longueur permise par le gril, longueur déjà assez bornée par la mesure ordinaire du pendule à secondes, même à 9 verges.

1598. On tracera donc d'abord la ligne longitudinale du milieu de l'épure, et sur l'une de ses extrémités on décrira le cercle de la lentille de 8 à 9 pouces de diamètre, pesant 10 à 12 livres, et dont le rayon raccourcit déjà la longueur du gril. Ensuite, du centre de la lentille on portera sur cette ligne, non pas la longueur ordinaire du pen-

dule à secondes qui est 36 pouces 8 lignes 1/2 forte, car cette mesure serait insuffisante pour un pendule composé de plusieurs verges et de traverses dont le poids fait remonter le centre d'oscillation et allonge la figure du pendule; mais, ne pouvant prévoir ni ce poids ni la quantité dont le centre d'oscillation sera remonté, que par un calcul que nous avons donné comme trop compliqué et d'autant plus sujet aux erreurs de ceux qui n'y sont pas habitués, et s'agissant ici d'ailleurs d'une méthode pratique plus facile, en faisant d'abord le pendule trop long, on prendra provisoirement sur la ligne tracée une distance d'environ 42 pouces à partir du centre de la lentille, et on y tracera la ligne inférieure de la mâchoire du haut des ressorts de suspension, point près duquel plient ces ressorts et que l'on peut considérer comme l'axe de suspension; on y tracera ensuite le reste de la suspension pris aux dépens des 42 pouces; les ressorts auront 2 lignes au plus de longueur entre les mâchoires; celle inférieure entrant seule avec les ressorts dans cette mesure de 42 pouces prendra 6 lignes, et les crochets de la traverse A du haut du pendule 6 autres lignes au moins, ce qui retranchera environ 15 lignes de ce côté sur l'espace restant pour le gril, celui-ci, tant par la suspension que par le rayon de la lentille, se trouvera raccourci d'environ 6 pouces; en ôtant cette longueur de celle de 42 pouces, il restera environ 36 pour le gril seul, qui sera certainement trop long; mais il vaut mieux qu'il en soit ainsi, comme on le verra plus loin. C'est donc en occupant cet espace de 36 pouces que l'on tracera toutes les traverses, les tringles d'acier et celles de laiton, suivant la figure 1re que nous en donnons pl. XLVII, en se rappelant qu'elle n'est que de demi-grandeur et qu'il faut en doubler toutes les dimensions.

1599. Mais il y a un objet à considérer dans tout pendule astronomique, c'est qu'il est souvent utile de lui faire suivre le temps sidéral qui avance par jour sur le temps solaire moyen de 3 minutes 54'' ,9, ce qui nécessite alors de raccourcir le pendule d'environ 2 lignes 31/100, près de 2 lignes 1/3. Pour rendre cette opération facile, on garnit le haut de la lentille d'une boîte oblongue *c c* vue au trait, même figure et planche, qui embrasse juste la traverse B du bas du gril, laquelle doit y pouvoir entrer librement de 5 lignes de profondeur, c'est-à-dire plus qu'il ne le faudrait au raccourcissement pour le temps sidéral, mais afin de laisser aussi de la latitude à l'écrou de réglage; cette boîte ou auget s'ajuste proprement à la lentille entaillée en conséquence, de manière à en faire dépasser le contour par les côtés de la boîte, pourvu que le milieu du bord supérieur de celle-ci se trouve arriver à peu près au cercle de la lentille passant par la ligne du milieu de l'épure, *le tout à vue et sauf les autres mesures* essentielles.

1600. Ce ne sera donc qu'après avoir tracé, et la suspension dont nous donnerons plus loin la figure avec ses proportions, et la boîte de la lentille dont nous venons de parler, que l'on tracera les traverses du gril, avec leurs distances entre elles, etc., en faisant pénétrer la traverse inférieure B d'un tiers de sa largeur dans l'auget de la lentille; c'est d'après cette épure que l'on exécutera le gril, mais on se sera assuré avant que, la longueur totale d'acier étant divisée en 121 parties, 75 au moins ou même plus de semblables parties se trouvent contenues dans la longueur totale du laiton; car si cette mesure ne se trouvait pas à très-peu près dans le laiton, la compensation absolue pourrait ne pas

avoir lieu, et le pendule compensateur resterait imparfait. Nous laisserons à l'intelligence et à l'habitude des travaux les soins raisonnés de détail, pour que les parties aient toute la régularité voulue, que tous les trous des traverses soient percés ensemble et droits, que ceux pour les chevilles dans les tringles qui se correspondent soient à la même distance entre eux et parallèles en tout sens, etc., en un mot que tout ce qui convient dans une bonne exécution soit observé, afin que le gril et tout le pendule reste solidement dans son plan, sans se tordre sous l'effet du poids assez considérable ici de la lentille, un tel ouvrage ne devant être entrepris que par des mains exercées à la bonne et solide exécution, et dirigées par un esprit en état d'en comprendre les effets.

Tout ce travail étant avancé au point d'être bien adouci et préparé pour le poli définitif, qui ne se fera néanmoins qu'en dernier lieu, on remontera l'ensemble du pendule pour en éprouver la longueur. Le mouvement ou le rouage auront été préparés de même et mis en état de marcher et de bien fonctionner, soit dans l'échappement, soit dans toutes les autres parties.

1601. On placera et assujettira solidement la nouvelle Horloge contre un mur, à côté d'une Pendule à secondes déjà réglée exactement sur le temps solaire moyen ; ou bien, à défaut de ce guide, on se servira du pendule théorique décrit ci-dessus (1543) ; on évaluera le retard prévu d'avance de la nouvelle pièce par les coïncidences de ses oscilla tions avec celles du pendule à fil simple pendant une heure juste ; on en conclura le retard diurne, c'est-à-dire celui qu'elle ferait en 24 heures ou par jour ; on répétera cette même comparaison deux ou trois fois pour en prévenir les erreurs, et lorsque l'on sera bien assuré, à une seconde près, du retard diurne de la pièce sur le temps moyen, le pendule se trouvant ainsi beaucoup trop long, on fera le calcul de la quantité précise dont il devra être raccourci, à raison de 1/100 de ligne pour chaque seconde dont il retarderait en 24 heures. Si, par exemple, la nouvelle pièce ne retardait que d'une seconde par heure ce serait pourtant déjà 24 secondes de retard en 24 heures, et le gril aurait besoin d'être raccourci de 24/100 de ligne, ou à très-près d'un quart de ligne ; mais alors les trous nouveaux retomberaient en partie sur les premiers trous qu'il faudrait reboucher, et c'est ce que nous avons voulu éviter en donnant d'abord beaucoup trop de longueur au pendule; mais heureusement il retardera bien davantage. Si le retard pendant une heure est d'une minute, ce sera 24 minutes pour 24 heures, ou 1,440 secondes, et par conséquent 1440/100 de ligne à retrancher, ce qui revient à 14 lignes 40/100 ou 4/10 dont le gril devra être raccourci, et ainsi de suite, en employant ce même petit calcul arithmétique qui est des plus ordinaires. On marquera donc sur l'épure la nouvelle mesure du gril, pour faire dans le haut seulement des tringles de nouveaux trous de chevilles et couper le surplus des tringles, après quoi le gril étant rassemblé, remonté et éprouvé de nouveau, ce qui manquera à sa vraie longueur précise pour le réglage pourra aisément être corrigé par moins d'un tour de l'écrou du centre de la lentille.

1602. On voit que cette méthode toute simple, mais longue à décrire, en y allant peu à peu, est du moins sûre dans ses résultats et n'exige pas de calcul mathématique, et que par l'excès de sa longueur donné d'abord, on ne risque pas de faire tomber les

nouveaux trous des tringles tout à côté des anciens. Il vaut bien mieux, comme nous l'avons dit, avoir quelques bouts de tringle de reste qui peuvent toujours trouver leur emploi dans un atelier, que de s'exposer, faute d'usage, à faire des erreurs dans un calcul long, compliqué et difficile, qui, si elles sont en moins, ou très-peu en plus, obligent de refaire toutes les tringles d'un gril, ou font tomber les nouveaux trous sur les anciens; car on ne peut pas se permettre de rallonger les tringles, travail qui pourrait changer leur dilatation et emploierait d'ailleurs beaucoup de temps. Deux heures ou trois au plus d'observation et souvent une heure et demie, nous ont suffi pour raccourcir un gril trop long, et qui, corrigé suivant ce calcul, se trouvait de longueur juste à 5 ou 6 centièmes de ligne près, ce qui était l'affaire de l'écrou de réglage.

Si l'on emploie dans un pendule à gril la boîte ou auget que nous avons indiqué ci-dessus, et où la traverse inférieure B doit pouvoir rentrer des trois quarts ou au moins à moitié de sa hauteur, on pourra tracer sur cette traverse B la ligne de rentrée où le pendule suit le temps sidéral. Avec cette construction, l'on n'a plus besoin des deux bouts *c c* de tige pour maintenir la lentille dans le plan des oscillations, puisqu'elle est maintenue en ce sens par sa boîte supérieure recevant la traverse du bas du gril, comme il a été dit, et comme il est indiqué au trait dans le bas de la fig. 1ʳᵉ.

Pendule à cinq tringles compensé par le zinc.

1603. L'insuffisance accidentelle et trop à craindre de certaine quantité de laiton, citée plus haut, et qui oblige parfois d'entailler la lentille, lui a fait substituer, vers le commencement de ce siècle, un métal beaucoup plus dilatable, le *zinc*, qui, étant tiré à la filière ou au banc, a une dilatation à peu près triple de celle de l'acier sous la charge de la lentille, et par suite n'exige pas autant de longueur que le laiton; aussi le pendule à gril compensé ainsi est-il réduit ici à cinq tringles, trois d'acier et deux de zinc, et même on n'a guère besoin que de 18 à 20 pouces de longueur correctrice, si le zinc a été tiré au banc; mais on laisse d'ordinaire le surplus de hauteur pour garnir le gril, qui a aussi 2 traverses de sûreté, en *b* et *c*, fig. 2. Lorsque le zinc n'est que fondu, il se dilate moins et il faut employer presque toute la longueur du gril; mais ce métal est alors très-fragile, car les premiers traits au banc sur le zinc exigent des précautions : il faut qu'il ait été martelé antérieurement avec beaucoup de modération; alors les saumons de sa fonte doivent être chauffés dans l'eau bouillante et frappés pendant qu'ils sont chauds jusqu'à ce que le marteau, à petits coups, leur ait fait acquérir un 1ᵉʳ degré d'extension. On les fait chauffer de nouveau lorsqu'ils se refroidissent, jusqu'à ce que le marteau en ait à peu près doublé la longueur; c'est alors que le zinc peut être soumis à l'épreuve du tirage; 7 à 8 traits de filière suffisent pour le rendre assez malléable. Avec un tirage plus répété, il deviendrait trop mou pour soutenir le poids de la lentille; l'ajustement est le même qu'au gril précédent; celui de la fig. 2 n'a même qu'une verge de zinc, toujours plus grosse que l'acier, avec un ressort à boudin dans le haut pour la soulager. On ajoute quelquefois à l'assemblage du gril deux amortissements latéraux ou pièces de laiton pointillées en cintre ou *partie de rond creux*, fig. 1, vers *c c*, comme ornement destiné à adoucir à l'œil le passage de la forme ronde de la lentille à celle droite des verges; leur poids et

celui du gril augmentent la longueur du pendule entier d'environ 1 pouce. *Le gril à 2 verges de zinc est préférable.*

PENDULE A MERCURE, DE GRAHAM.

1604. Le gril attribué principalement à Harrison fut aussi employé par Graham ; mais, soit par défiance de la régularité de dilatation des métaux, que quelques observateurs soupçonnent en effet de n'agir que par sauts et par intervalles, soit pour simplifier l'appareil, Graham préféra, pour corriger la dilatation de l'acier, l'emploi du *mercure* contenu dans un vase de verre servant de lentille, dont la dilatation lui paraissait plus libre et suffisante pour corriger l'allongement de sa seule tringle d'acier ; ce moyen eut du succès, et comporte même l'avantage d'avoir une tige la plus légère possible, et de réunir presque tout le poids dans la lentille, en se rapprochant ainsi autant qu'il se peut du principe mathématique. L'article suivant, sur ce sujet, est extrait de la traduction d'un ouvrage anglais, du capitaine *Kater ;* les mesures y sont anglaises, sur quoi nous prévenons le lecteur que le pied anglais est plus court que le pied de France d'environ onze lignes de ce dernier, ou que le pouce anglais est moindre que celui de France de près d'une ligne (V. les tables de l'*Annuaire* pour plus de précision). Ici l'exactitude absolue ne sera pas de rigueur, parce que le pendule doit toujours être tenu d'abord trop long, pour le raccourcir par l'expérience, suivant notre méthode exposée ci-dessus ; outre que nous allons bientôt donner les mesures exactes d'un pendule à mercure éprouvé, dans notre description prochaine d'une Horloge astronomique suffisamment employée dans divers observatoires, et d'une construction beaucoup plus soignée que l'ancienne décrite ci-dessus (1537).

1605. « La verge ou triangle S B C, fig. 3, pl. XLVII, est d'acier, cylindrique et d'environ 1/4 de pouce de diamètre, ou bien méplate et alors de 3/8ᵉˢ de pouce de largeur, et de 1/8ᵉ de pouce d'épaisseur ; sa longueur doit être de 34 pouces (mesure anglaise); la partie filetée en vis de son extrémité inférieure dépasse l'étrier en dessus et en dessous d'un demi-pouce, pour y recevoir deux écrous, B et C. Cette partie filetée porte au milieu de sa longueur une petite tête de vis ou tenon entrant juste et glissant en B dans une petite rainure verticale et intérieure du canon de la tête A B C de l'étrier, afin que celui-ci ne tourne pas sur la verge S B lorsqu'on serre les écrous B C. Les deux montants latéraux A D, I K sont de la grosseur de la verge. Le sommet B de l'étrier, pièce plate, sauf son canon du milieu, est épaisse de 3/8ᵉˢ de pouce, son canon en B C a 1 pouce de diamètre extérieur, et son trou laisse passer la vis de la verge librement, mais sans jeu. La hauteur intérieure de A en D est de 9 pouces 1/2 ; la distance entre A et I ou D et K est d'environ 3 pouces. La base H de l'étrier est épaisse de 3/8ᵉˢ de pouce, et creusée de 2 lignes et 1/2 pour recevoir librement la base d'un cylindre de verre. Un couvercle G à rebords s'applique et embrasse librement le bord de l'ouverture du verre, et porte de chaque côté un épaulement entaillé et vissé aux deux montants latéraux. Le vase de verre contenu sans ballottement sensible ne doit pas être gêné, pour laisser libre sa dilatation particulière, qui d'ailleurs est très-petite, ainsi que son expansion en tout sens. Plusieurs

constructeurs font flotter sur la surface du mercure en L un disque de glace épais d'une à deux lignes, à bords arrondis et polis, et d'un diamètre presque égal à celui intérieur du cylindre, c'est-à-dire avec un quart de ligne de jeu, pour prévenir la fluctuation de la surface du mercure et son oxidation par l'air, comme aussi pour conserver son niveau. Vers le bas en H est un index à charnière, pouvant être relevé pour la facilité de poser l'étrier sur sa base, quand il n'est pas suspendu ; le limbe pour les arcs d'oscillation doit être divisé en degrés et non pas en pouces ; la distance de l'axe de suspension à la pointe de l'index formant un rayon d'environ 44 pouces (anglais), chaque degré du limbe peut avoir 0 pouce, 708 (à peu près 7/10 de pouce anglais); la hauteur du mercure, qui ne se détermine qu'en réglant l'Horloge, est indiquée d'avance dans la figure par une ligne pointillée en L comme un premier à-peu-près.

1606. Si l'on voulait calculer la dilatation du mercure, il faudrait avoir égard à celle du verre; mais il vaut mieux s'en rapporter aux effets plus sûrs de l'étuve en y faisant marcher la pièce, vu la facilité d'augmenter ou diminuer la masse du mercure, et en rétablissant à mesure la longueur totale du système par le double écrou. L'auteur de cet article ajoute avoir employé avec succès un cylindre en verre de 7 pouces (anglais) de profondeur, soufflé avec la tringle de verre de même pièce ; mais cette construction paraît bien fragile, etc.

1607. Nous rapportons cet article pour donner une première idée de l'invention de *Graham* dans laquelle nous retrouvons encore l'avantage de ne point surcharger la tringle du pendule d'accessoires qui en augmentent la longueur. Le mercure est aussi susceptible d'une dilatation plus libre et facile à modifier par la seule quantité ; on peut en retirer aisément de petites portions avec un syphon recourbé, et encore plus facilement en ajouter; mais comme rien n'est à l'abri de quelque inconvénient, parce que rien n'est parfait dans les ouvrages humains, ni même dans la nature, relativement à nos idées ou nos besoins, si l'on reproche au gril l'intermittence de ses effets, qui provient peut-être en partie des frottements de son armure, on objecte contre la composition de Graham que sa tringle est pénétrée plus promptement par la température que la masse de mercure qui lui sert de lentille et qui est ici le moyen essentiel de compensation. Quoiqu'il ne résulte de ce cas qu'un léger retard dans l'effet, cette observation est juste, mais l'inconvénient ne serait peut-être pas sans quelque remède facile. Nous avons pensé à ce sujet que si la tringle légère de Graham était enveloppée d'un tube mince en acier ou en fer tiré, qui n'y toucherait pas sur sa longueur et laisserait entre les deux pièces une suffisante couche d'air, mauvais conducteur du calorique, on pourrait peut-être allonger le temps de pénétration de la tige et le rendre égal à celui de la masse de mercure, qui, avec plus de mouvement et traversant plus d'air, ne peut éprouver un retard de pénétration très-considérable. On conçoit du reste que cette enveloppe, libre du haut, aurait sa dilatation propre indépendante de celle de la tringle, serait aplatie en olive comme aussi la tringle, afin de présenter à l'air les deux angles de cette forme, etc. C'est une expérience à faire, et cette légère correction, si elle réussissait, ajouterait peu à la perfection de l'idée de Graham, si heureuse en elle-même, comme tout ce que concevait cet habile

artiste, que nous et bien d'autres considérons comme le type de la perfection dans l'Horlogerie anglaise (1). Graham, moins préoccupé, y eût encore mieux pourvu.

1608. Une 3e méthode de compensation du pendule simple à tige ou tringle d'acier ou de fer, est d'appliquer au bas de la tige de chaque côté et au-dessus de la lentille une lame bimétallique courbée en forme de fer à cheval et chargée d'une masse que le calorique en augmentant lui fait relever assez pour compenser la moitié de l'allongement propre de la tige. Cette composition a été vue en petit, fig. 5, pl. XLVI. La lentille *g* est suspendue au centre par une chape de fer *f*, faisant partie de la tige *f c b a*. Les lames bimétalliques sont aussi larges et épaisses que la tige, pour n'être pénétrées que simultanément avec elle par la température. Les petites sphères ou masses de compensation *b* et *e*, à la même hauteur et distance de chaque côté de la tige, sont montées ou vissées chacune sur une longue vis qui n'est pas exprimée dans cette figure réduite, mais qui doit terminer chaque lame. Il doit y avoir aussi des contre-écrous pour fixer les masses; celles-ci, établies d'abord trop fortes, sont réduites par l'expérience jusqu'à ce que, sorties vers l'extrémité de leur vis, elles y produisent trop d'effet, et que, rentrées à fond, elles n'en produisent pas assez; alors on en règle la place définitive en faisant marcher la pièce dans l'étuve, au froid et au chaud; dans le dessin, elles sont figurées trop près de la tige, il y faut plus de distance pour leur latitude de déplacement.

1609. On remarquera dans le haut du même pendule qu'un point de sa tige en *a* porte à la hauteur du coude de la fourchette A, fig. 3, une coulisse mobile par deux vis latérales, pour amener la pièce à *être* ce qu'on appelle d'*échappement*. Cette coulisse remplace ici la vis de rappel dont on charge d'ordinaire le bas de la fourchette, en augmentant le frottement de son pivot. La fourchette pourrait être bien plus légère et roide

(1) Les détails précédents sur le gril, trop longs sans doute pour ceux qui connaissent bien cette méthode, sont destinés principalement à ceux qui s'en font une fausse idée, ou qui n'en ont aucune, et le nombre en est assez grand. Un Horloger jouissant de quelque réputation nous montra un pendule de sa composition, dont la tige était composée de trois tubes de métaux différents, *car deux ne lui suffisaient pas;* ces tubes avaient été tirés ensemble et se trouvaient serrés comme s'ils eussent été soudés sur toute leur longueur; l'auteur se vantait d'avoir imaginé une construction des plus solides!!!... Il croyait probablement que la réunion des métaux avait la propriété occulte de neutraliser sur eux l'effet du calorique!... tandis que cet effet doit être libre; l'excès du laiton, plus dilatable que l'acier, devant être employé mécaniquement, comme on l'a vu, à corriger la moindre dilatation de l'acier en le remontant aussi librement que possible, sans déplacer le centre d'oscillation du système entier. Un autre Horloger, aussi répandu et connu, avait composé sa tige d'une verge d'acier et deux de laiton, où la longueur de laiton n'aurait pas été suffisante à beaucoup près, puisqu'il ne faut pas moins de quatre verges de laiton pour compenser la longueur des cinq d'acier, comme on l'a dit ci-dessus, ce qui procure à peine une dilatation suffisante du laiton; mais celui-ci avait lié très-fortement son faisceau de trois verges par les deux extrémités, et aussi solidement que si le tout eût été traversé de fortes chevilles rivées, et se plaignait de grandes variations de sa pièce par les diverses températures, ce qui provenait de ce que sa compensation, déjà insuffisante en mesures, était encore gênée dans son effet mal entendu, ne produisant qu'une forte contrariété entre l'effet des trois verges, et devant même faire gauchir sa tige, etc. Il en concluait que les principes de correction étaient *faux!!...* Il n'y a de *faux* en cela que l'esprit qui en avait si mal saisi le principe. Ces deux Horlogers n'existent plus, et nous ne rapportons pas ces erreurs par la vanité d'en être exempt, puisque d'autres les connaissent comme nous. Notre ouvrage ne tend qu'à exposer l'opinion démontrée des habiles artistes dont nous estimons plus l'expérience que nos propres idées. Quoique fort âgé, ayant beaucoup vu, médité et exécuté, nous apprenons tous les jours ce que nous ne connaissions pas encore, et nous tâchons d'avertir quelques-uns du peu que nous croyons connaître un peu mieux. Nous ne donnons, du reste, comme certaines que les opinions dont l'avantage est démontré par un long usage, plus sûr que tous les raisonnements, et si nous proposons nos propres idées, nos conjectures, c'est pour qu'elles soient appréciées définitivement par de suffisantes épreuves.

à la fois, si on la formait d'un petit tube d'acier mince et vide, tiré cylindriquement, tenu en position verticale et parallèle à la platine, terminé, au coude du bas, par une lame d'acier de peu de largeur, qui y serait soudée ou rivée; cette lame horizontale pénétrerait dans la coulisse du pendule, où ses côtés appuieraient de champ contre les parois bercées de la coulisse. Ceux-ci, saillants en arrière, entreraient dans un vide assez grand de la tige élargie exprès à cet endroit, afin que le point de contact de la petite lame avec les parois de la coulisse eût lieu juste au milieu de l'épaisseur de la tringle, avec liberté et toutefois le moins d'ébat possible. L'obliquité de la fourchette, quand elle est plus éloignée de la platine dans le bas, augmente le tirage sur son pivot. La fig. 6 reproduit la coulisse du pendule d'une manière un peu plus distincte et encore trop petite pour être assez détaillée, mais l'intelligence de ceux qui adopteront cette méthode y suppléera aisément.

1610. Une grande roue légère et évidée se voit en *b*, à deux pouces au-dessus du milieu du pendule; elle est taillée à petites dents droites à sautoir; son arbre roule dans un trou de la verge, et s'enveloppe d'une longue chaîne de Montre à laquelle est attaché le curseur de forme lenticulaire. Cette chaîne toujours plaquée contre la verge en partage la température; un sautoir en forme d'ancre permet au léger contact du doigt de remonter ou descendre le curseur d'une seule dent, sans arrêter le pendule, et cette légère modification de la hauteur du curseur peut produire beaucoup moins d'une seconde en 24 heures, suivant le poids des parties. La lentille du pendule peut peser 10 livres, et le curseur 4 ou 5 onces ; celui-ci est formé de deux pièces jointes à vis et pieds pour la facilité d'y pratiquer la mortaise pour la tige accompagnée d'un lardon à ressort doux. Il y a en arrière de la tige un ressort à fourchette qui retire en arrière la roue de sautoir, à mesure que la chaîne s'en déroule. On voit au-dessus de l'ancre le petit ressort qui appuie assez contre le sautoir pour que le curseur ne puisse entraîner la roue. Cette disposition de Martin a eu du succès, et la figure indique les moyens d'y parvenir à ceux qui, versés dans les travaux et combinaisons de ce genre, doivent seuls s'en occuper.

Pendule à tige de sapin.

1611. Il y a aussi une 4e construction du pendule dont la tige est simplement formée d'une règle de sapin bien sec et de fil bien droit, qui paraît changer infiniment peu de longueur, et que l'on peut employer pour des régulateurs de seconde classe ; mais on a à craindre sa torsion par les diverses températures. On la prévient, en partie du moins, en refendant par la moitié l'épaisseur de 4 lignes d'une tringle de bois large de deux pouces 1/2, en retournant en dedans les deux faces du dehors et reportant le haut de l'une au bas de l'autre. Le tout, collé et préservé de l'humidité par un vernis de gomme copale ou autre, porte deux garnitures de métal, l'une formant les crochets de suspension, l'autre la vis pour l'écrou du centre de la lentille. On substitue parfois à celle-ci un cylindre de même poids, pour neutraliser la torsion sous le rapport du plan de la lentille à l'égard de celui d'oscillation, car en ce sens un cylindre n'a point de plan, tandis que la déviation d'une lentille influe sensiblement sur la marche. La torsion réduit aussi la longueur totale de la tige, mais de très-peu. On y pratique quelquefois

une correction au moyen de rondelles en zinc ; cette construction si simple apporte une économie notable dans l'exécution des Horloges publiques ou de campagne. On trouvera un peu plus loin, dans le chapitre suivant, diverses suspensions à ressorts pour le pendule.

CHAPITRE VII.

DESCRIPTION D'UNE HORLOGE ASTRONOMIQUE MODERNE OU RÉGULATEUR A SECONDES, AVEC SON PENDULE COMPENSÉ PAR LE MERCURE.

Éprouvés dans plusieurs observatoires (1).

1612. Cette pièce d'observatoire et d'amateur, si utile aux sciences physiques, et réunissant la plus grande simplicité à la perfection des détails, comme nous l'avons toujours recommandé ailleurs, est représentée avec ses développements dans nos deux planches XLVIII et XLIX.

On trouve dans la 1re de ces deux planches, fig. 1, le profil général du mouvement, la communication de sa fourchette avec le pendule, et la suspension de celui-ci à la console du chevalet.

La fig. 2, même pl. XLVIII, donne le calibre ou plan A C D B vu par l'arrière, sur la face intérieure de la platine des piliers, et par suite l'ensemble est vu retourné de droite à gauche, la platine du nom étant enlevée ; d'où il résulte pour le spectateur que la roue de secondes paraît marcher ici à gauche, comme aussi la roue de minutes, et que la première grande roue, celle du cylindre pour le poids, paraît marcher à droite, tandis que ce serait le contraire si ce calibre était vu du côté du cadran, supposé ici se trouver à l'arrière du plan ; il suffit donc d'en être prévenu. L'engrenage de la première grande roue a lieu directement avec le pignon de minutes, sans *roue de temps* intermédiaire, ce

(1) Par H. J. Kessels, *Chevalier de Dannebrog, membre de l'Académie des sciences de Stockholm, de la Société mathématique de Hambourg*, etc., à Altona, près de Hambourg.

Cette construction a été éprouvée avec succès, ainsi que nombre de chronomètres du même auteur, dans les Observatoires dont les noms suivent :

Nicolajew.	Russie.	Koenigsberg.	Prusse.
Dorpat.	Russie.	Bonn-sur-le-Rhin.	Prusse.
Moscou.	Russie.	Hambourg.	*V. anséat.*
Pulkowa.	Russie.	Altona.	*Holstein.*
Stockholm.	Suède.	Goldberg.	*Mecklenbourg.*
Upsala.	Suède.	Bruxelles.	*Belgique.*
Lund.	Suède.	Kremsmunster.	*Autriche.*
Cristiania.	*Norwége.*	Senftenberg.	Bohême.
Cracovie.	*Pologne.*	Prague.	Bohême.
Copenhague.	*Danemark.*	Athènes.	*Grèce.*
Kensington.	*Angleterre.*		

qui supprime l'inertie de l'un des plus forts mobiles et les frottements de son engrenage comme de ses deux pivots. L'action de la première grande roue est entretenue pendant le remontage par deux ressorts auxiliaires attenant au crochet du cylindre. Le cliquet auxiliaire se voit en cage sur tige et pivots.

La fig. 3 représente la face extérieure A B D C de la même platine des piliers, c'est-à-dire la face qui se trouve sous le cadran enlevé, ce qui laisse voir la minuterie et des ponts portant leurs bouchons pour les trous des pivots du rouage. Les quatre lignes extérieures qui enveloppent cette platine figurent les bords du chevalet fixé vers ses angles au fond de la boîte par quatre fortes vis. Le chevalet porte la base du mouvement arrêté sur les supports du bas par deux vis à têtes molettées qui sont en dessous. Le tout est soutenu par un fort crochet, fig. 5 *a*, scellé solidement dans un gros mur.

La forme générale, un peu pyramidale latéralement, est celle préférée en Allemagne et ailleurs, comme offrant plus de solidité sur sa base. (N. B. *Ces figures de nos planches ne sont que de demi-grandeur.*)

La légende suivante de l'auteur achèvera la description de ce mécanisme et de ses parties, assez clairement pour ceux qui, versés dans ce genre, sont seuls censés pouvoir s'en occuper avec fruit; plusieurs parties déjà indiquées ci-dessus s'y trouvent répétées, pour mieux conserver la pensée de l'auteur.

Légende de l'auteur, plus développée, pl. XLVIII.

La fig. 1re représente le haut de la tige du pendule astronomique à mercure, monté sur son chevalet, vu de profil ou de côté.

Fig. 2 est le mouvement vu par l'arrière, la platine du nom étant enlevée. A, 1re grande roue ; F, crochet portant vers A un cercle relevé de champ, contre lequel appuie là roue; les deux ressorts de la force auxiliaire sont vissés sur le crochet. B, grande roue moyenne portant en avant du cadran la grande aiguille de minutes vue de profil sur la gauche, et équilibrée sous le cadran par la pièce K ; C, petite roue moyenne ; D, roue d'échappement; E 2, l'ancre.

Fig. 3. Mouvement monté sur son chevalet, et vu par le devant ; G, roue des heures pour la minuterie; H, roue de renvoi engrenant dans le pignon de chaussée de 10. Les trous des pivots du rouage sont tous établis dans des bouchons séparés faits en cuivre de chaudière et fixés à leurs barrettes par deux vis, de sorte que, si avec le temps un pivot prend trop de jeu, on peut reboucher le trou en plein, le centrer et le percer de nouveau sur le tour en l'air, ou bien refaire un nouveau bouchon; alors le tout étant fidèle, c'est-à-dire le trou étant rigoureusement centré et percé droit sur le tour, l'engrenage doit conserver la même précision qu'il avait primitivement. Les nombres de la denture sont cotés près de chaque mobile.

Fig. 4 *a*. Support du pendule vu de face, le double ressort y étant accroché.

Fig. 4 *b*. Le haut du pendule vu de côté avec son ressort de suspension. Le support (ou console) du pendule est ajusté et fixé au chevalet en 4 *b* par une forte vis à l'arrière et deux pieds qui tiennent au chevalet.

Fig. 4 *c*. Bec du support vu de profil. On voit dans le haut du chevalet, et de profil, l'une des quatre vis à têtes rondes qui servent à le fixer au fond de la boîte ; le chevalet est incrusté dans ce fond et en déborde d'une ligne; les têtes des vis qui le fixent sont également incrustées dans le bois, de sorte qu'il reste à l'épaisseur du fond de la boîte, en ces points, 1 pouce 8 lignes de France.

Fig. 5 *a*. Crochet du chevalet ; il sort du mur depuis x, et entre dans le mur ou dans la pierre de 3 pouces et demi. Le collet et les parties en biais sont faits sur le tour, ensuite on lui donne sa forme extérieure en fig. 5 *b a*, où le crochet est vu de profil ; il est vu de face en fig. 5 *b* par le bout du devant, et par le dessous en fig. 5 *c*.

Fig. 6 *a*. Partie du bas de la fourchette avec sa vis de rappel à frottement dur ; à la pièce mobile vue fig. 6 *b*, il y a un contre-poids ou disque qui sert à équilibrer la fourchette, et partie du poids de l'axe et de l'ancre ; on voit aussi, mais sans détails (ici trop petits), l'entrée de la broche f 6 *b* dans la tige du pendule ; le trou y est très-étranglé (ou très-court), afin de pouvoir y ajuster la broche de manière à ce qu'elle y entre libre, mais sans le moindre ballottement : et comme les parois fort courtes du trou sont bercées, la broche, quoiqu'elle n'y entre que juste, peut se mouvoir assez librement en tout sens légèrement inclinée, dans le cas où elle ne serait pas rigoureusement perpendiculaire au trou ou au plan d'oscillation. La partie étranglée du trou est en cuivre.

Fig. 7 *a*. Rosillon vu en petit de l'axe du remontoir ; il est vu dans l'autre sens et de grandeur naturelle, fig. 1, en F 7 *a*.

Pour affermir le carré de remontoir qui est assez mince, j'ai ajusté à cet égard sur la platine une pièce par 2 pieds et les deux vis qui sont vues pointillées en 7 *a*, fig. 1 ; c'est dans cette pièce que roule le pivot du carré, ce qui raccourcit celui-ci et rallonge l'axe ; et par-dessus, à l'entour du trou, est une partie relevée et tournée ronde, sur laquelle s'ajuste une autre pièce fixée par deux vis ; celle-ci porte un canon sur lequel tourne la roue d'heures : le canon de son aiguille s'ajuste à celui de la roue d'heures ; ces parties de minuterie, trop petites pour être indiquées dans la gravure, se conçoivent aisément sans plus d'explication.

Sur la roue de renvoi H, figures 5 et 1, est ajusté un grand pignon en cuivre de 20 ailes, vidé intérieurement et fixé par une vis à portée. La chaussée porte le contre-poids K pour équilibrer l'aiguille de minutes.

Aux quatre coins du chevalet, fig. 5, il y a par l'arrière des rondelles placées en saillie comme en B D C A, traversées chacune par sa forte vis ; ce sont ces rondelles seules qui portent sur le bois. Le trou au-dessous de P qui reçoit le crochet de la fig. 5 *a*, doit être fraisé par devant, afin que, quand le crochet y est, on puisse le couvrir d'une petite plaque P, comme en fig. 5. (Toutes ces parties ne sont ici que de demi-grandeur dans nos planches, mais il est facile, comme il a été dit ci-dessus, d'en doubler les dimensions pour avoir la juste proportion de l'original.)

(NOTA. En exécutant le rouage seul et ses parties relatives, d'après les diamètres du rouage de nos figures actuelles, la descente du poids d'environ 4 pieds pourrait durer plus d'un mois.)

Diamètre des pivots en 48mes de ligne.

Pivots du devant dans la platine des piliers.		Pivots dans la platine du nom, ou de l'arrière.
Première grande roue	55/48es	50/48es
Grande moyenne	30/ —	25/ —
Petite moyenne	14/ —	14/ —
Roue d'échappement	10/ —	10/ —
Ancre	10/ —	10/ —

PLANCHE XLLIX.

1613. La fig. 1re représente l'échappement à ancre deux fois grand comme nature, pour y faire mieux remarquer la forme des dents; il y est donc quatre fois plus grand que dans la fig. 2, pl. XLVIII, qui est déjà réduite à moitié ainsi que les autres figures. La levée est de 1° et 1/2 (1° 1/3 ou 1/5 suffirait). L'extrémité des dents est laissée large, dans le sens qui se voit, pour conserver plus de solidité à leurs pointes, et la chute doit être assez grande pour affranchir cette épaisseur de l'extrémité de la dent; et même la petite superficie extérieure de cette extrémité est un peu inclinée en arrière, ce que l'on établit avec égalité au moyen d'un instrument connu. L'angle antérieur de la dent peut ainsi rester extrêmement vif sans perdre de sa solidité. Plus une ancre est petite et plus elle exige de précision dans ses pivots, ses trous et toute son exécution. *Fig. 4, cadran à 24 heures à mettre en rapport de grandeur avec les axes du calibre.*

1614. Fig. 2. Pendule à mercure de demi-grandeur dans toutes ses parties et vu de face : les pièces A C D sont en cuivre; les tringles latérales sont en acier et ajustées dans les parties A D où elles sont fixées par des chevilles à têtes molettées. La rainure intérieure du trou cylindrique du haut *b* de la partie A y est pratiquée à l'arrière, aussi n'est-elle que pointillée dans la figure; une dent ajustée à la tige peut y monter ou y descendre par l'effet du réglage et empêche la partie *a* de tourner sur la tige quand on meut l'écrou. La fig. A 1 est le dessus, et la fig. A 3 le dessous du triangle.

La pièce C 1, couvercle du cylindre de verre, doit pouvoir être élevée librement, afin qu'après en avoir ôté le bouchon L, elle puisse être aisément remontée jusque contre l'écrou de réglage et y être maintenue par ses chevilles placées aux deux trous supérieurs, pour le cas où l'on aurait à ôter le cylindre de verre ou à le remettre en place, ou pour ôter ou ajouter de petites quantités de mercure. I est un flotteur en verre portant un bouton fixé avec de la gomme pour l'enlever. Le poids du mercure est d'environ 10 livres (de Hambourg), et sa hauteur est indiquée provisoirement par le flotteur pointillé. Cette division en papier doit être collée à la hauteur de 6 P° 21 1/2 de France; elle sert uniquement à indiquer la quantité de mercure qu'il faut y mettre. L'écrou vu seul en B 1 est divisé en vingt parties dont chacune produit une seconde de temps; et chaque partie étant subdivisée en quatre, on peut en estimer la moitié à 1/8e de seconde. La vis porte cinq filets par ligne. (*La livre de Hambourg = environ* 15 *onces* 2/3, *mesure ancienne de France.*)

Fig. 3 *a* et *b* est une espèce d'entonnoir fixé au milieu de la tige du pendule; en y jetant un grain de plomb d'environ 0,31 de grain anglais, on fait avancer l'Horloge d'en-

viron 0"03 en 24 heures. Si on en a trop mis et si la pièce avance, on ôte des grains avec un petit bâton garni au bout de cire molle, sans déranger la marche du pendule dont on suit le mouvement. *Le cadran, fig. 4, est moins que moitié de l'original.*

La construction suffisamment indiquée de l'ancre est très-convenable pour y ajuster les pierres, vu que l'on y trouve la facilité d'avancer ou reculer les levées au besoin. On en voit l'épaisseur et l'ajustement avec une patte et deux vis, figure 2 *a*, où *x a* indique une épaisseur un peu trop forte du limbe de la roue d'échappement.

« Je me suis assuré par une longue expérience que les trous en pierre (rubis) ne conviennent pas à une Pendule placée dans un observatoire, ou bien il faut la nettoyer tous les ans : car, par l'humidité qu'elles éprouvent dans le rubis, les huiles ne s'y conservent pas; elles y deviennent rouges et gommeuses, tandis que dans les trous en bon laiton elles restent fluides pendant trois à quatre ans.

« Le cylindre pour le poids de l'Horloge astronomique est cannelé en hélice ou vis. Les pas en sont éloignés entre eux de 11/20es de ligne. Le pas est à gauche, afin qu'en remontant à droite le poids se rapproche de la tige du pendule, et qu'il s'en éloigne en descendant. La corde a 22/48es de ligne en diamètre. »

1615. Nota. L'auteur de cette Horloge astronomique, soignée, méditée et surtout si bien éprouvée, ajoute, dans sa correspondance particulière avec nous, à la suite de ces détails qui suffiront aux esprits intelligents et à la hauteur du sujet, les réflexions ci-après que nous en avons obtenu de pouvoir publier, comme partageant d'avance ses opinions, dont nous avons souvent émis quelques-unes en divers points de notre ouvrage avant que nous en eussions eu communication, parce que les mêmes principes fondamentaux, démontrés par la théorie et *surtout prouvés par l'expérience*, conduisent aux mêmes conséquences, à la variété près de quelques moyens de détail employés pour arriver à des effets analogues. Voici ces réflexions :

« . . . . Quelques-uns de vos lecteurs seront peut-être surpris qu'ayant déjà « fourni une vingtaine d'observatoires de Pendules astronomiques (sans compter un plus « grand nombre de Montres marines et Chronomètres portatifs), je n'aie adopté aucun « échappement libre ou à force constante, etc. Je les ai tous passés en revue, mais « aucun ne m'a satisfait. Un de ceux à qui on pourrait être tenté de donner la préfé- « rence est celui perfectionné par *Hardy;* mais il a dans son action 14 points de con- « tact, de sorte que, pendant deux vibrations, 14 actions ont lieu, dont 4 de chaque « côté pour enlever et pour quitter les détentes et les ressorts d'impulsion ; or, il est « reconnu généralement que ces nombreux points qui se touchent et se quittent conti- « nuellement finissent par former de fortes adhésions, surtout par les temps humides, « ce qui ne laisse pas d'influer considérablement sur la marche de l'Horloge astro- « nomique. Aussi n'ai-je jamais vu de marche publiée de ces pièces qui ait surpassé « celles des autres auteurs; et s'il n'y a pas un avantage réel, alors je préfère la sim- « plicité.

« Je vais vous citer ici un exemple tiré d'un excellent ouvrage de *Thomas Reid;* il doit « décourager ceux qui seraient tentés de faire de tels échappements.

« Il avait une Pendule qui suivait de très-près le temps moyen : l'échappement était « celui de *Mudge* pour pendules, avec des palettes à ressort à impulsion constante ; l'arc « total du pendule était un peu plus de 4°. L'échappement ayant été mis hors d'action, le « pendule resté en place ayant la même longueur, on a fait décrire au pendule libre un « arc total de 8°, qui se réduisait à moins de 4 pendant l'observation, de 1 en 8 mi- « nutes, ce qui fait 180″ ou 3 minutes en 24 heures. Donc, l'action des palettes à ressort « produisait une accélération de plusieurs minutes en 24 heures!!... Je demande aux « plus passionnés pour la force constante quelle confiance peut inspirer un échappement « dont le pendule est ainsi le jouet ?

« On reproche à l'échappement à ancre de troubler l'isochronisme, puisque la roue « occasionne du retard par son action sur les repos. Il n'est que trop vrai que les ancres « d'après l'ancienne dimension ont ce grand défaut. Mais si on les compare aux ancres « que je fais, on en verra bientôt la cause. J'ai ici sous les yeux une ancre d'une véri- « table Pendule de *Graham* et une ancre d'une Pendule d'Arnold ; elles se ressemblent « rigoureusement, ce qui prouve que Arnold a copié Graham et n'a pas hasardé de s'é- « carter des dimensions d'un échappement imaginé par ce grand maître. Les levées de « ces deux ancres sont éloignées du centre de 30 lignes. Or, les levées de mon ancre ne « sont éloignées du centre que de 5 lignes et demie (dans la fig. 1 *a*, pl. XLIX, qui est « deux fois grande comme nature, cet éloignement est de 11 lignes); il est aisé de con- « cevoir les avantages qui en résultent : plus on rapproche les levées du centre, plus « l'angle formé par la levée avec le repos se resserre pour la même quantité de levée ; « donc, la force communiquée par la roue aux plans inclinés reste proportionnellement « la même que si les levées étaient plus loin du centre avec des plans inclinés d'autant « plus longs ou formant un angle plus obtus avec la courbe des repos. (Mes pendules mar- « chent avec un poids de deux livres et demie, mesure de Hambourg, et ils ne descendent « que de 2 pieds de France en une semaine.) Mais le point principal est que l'action sur « les repos se réduit, pour ainsi dire, à zéro ; car l'expérience suivante que j'ai faite le « prouve évidemment. J'avais alors un Chronomètre à demi-secondes qui suivait exacte- « ment une Pendule faite pour l'observatoire de Stockholm. A une distance de 15 pieds, « j'ai placé une lunette sur une table pour mieux voir les oscillations de l'index du pen- « dule sur son limbe ; dans cet état j'ai détaché le mouvement, laissant le pendule libre « en sa place ; j'ai donné alors au pendule un arc d'étendue de 20′ de degré de plus que « l'arc qu'il décrivait avant. Au moment où j'entendais le battement du Chronomètre, je « voyais par ma lunette passer l'index du pendule sur la ligne verticale. J'ai continué « cette expérience pendant une heure, et je n'ai pu voir aucune différence, si ce n'est un « léger sentiment de retard qui aurait pu se monter à une fraction de seconde en 24 « heures. Cette expérience a été répétée plusieurs autres fois pendant une heure et a « donné absolument le même résultat, ce qui est une preuve évidente que cet échappe- « ment, ainsi rapproché du centre, ne trouble nullement les oscillations naturelles et « propres du pendule. Tout ce qui reste à désirer, c'est que les impulsions soient con- « stantes, *ce que l'on obtiendra mieux par de bons engrenages et l'exécution fidèle des*

« *mobiles, que par un mécanisme de remontoir, toujours plus compliqué* (et dont l'action
« répétée influe sur l'échappement avec une intensité variable, et très-sensible sur cette
« partie délicate).

« Lorsqu'une pièce est en marche et que je regarde avec ma loupe l'action de l'é-
« chappement de 20° de chaque côté, je vois à peine un mouvement des repos sur les
« pointes des dents, parce que les palettes sont très-près du centre. Et ce qui prouve que
« le frottement des repos est très-peu plus que compensé par la chasse des plans inclinés,
« c'est que, l'échappement étant mis hors d'action, le pendule libre tend à retarder
« d'une fraction de seconde en 24 heures, comme je l'ai dit plus haut.

« J'ai adopté la méthode de Ferdinand Berthoud, d'entretenir les arcs par de petits
« poids de 1/2, 1, 1 1/2, 2, 2 1/2 et 3 onces, etc., que j'ajoute au grand poids, ce qui
« réussit bien (*car l'épaisseur successive de l'huile diminue la force motrice et les arcs*).

« J'ai adapté aux Pendules des observatoires de *Moscou*, *Lund* et *Goldberg* une double
« caisse ouatée, qui devient utile pendant les grands froids, et surtout au dégel, lorsque
« la caisse ordinaire se couvre de glace (1). »

Développement pour la monture du réservoir à mercure formant la lentille du pendule

1616. Fig. B 1, dessus de la pièce triangulaire du haut du châssis; A 3, dessous de la même partie; *b*, *c*, aiguille fixe ou index des divisions de l'écrou, vu à part en B 1, et divisé; C 1, couvercle plein du cylindre de verre; D 2, bas du châssis recevant dans sa feuillure circulaire la base du cylindre de verre. Nota. Les têtes des chevilles de cette figure devant être sur le devant du pendule, devraient aussi se trouver en sens contraire de celui qu'elles ont dans la figure.

Remarques particulières et détachées : L'auteur ne désapprouve pas l'emploi du fer fondu pour former le cylindre réservoir; mais, outre que sa dilatation est plus forte et exige plus de hauteur de mercure, on n'y voit point du dehors la dilatation de ce dernier; du reste, cette dilatation de l'un ou de l'autre, presque simultanée avec celle du mercure, n'a pas besoin d'être calculée séparément et se trouve comprise dans les essais de compensation. La tige du pendule, quoique d'un très-petit diamètre comparativement, ne paraît pas être saisie plus promptement que le cylindre qui déplace un volume d'air beaucoup plus considérable et avec plus de vitesse. Dans un observatoire, la dilatation locale est très-peu différente; mais dans un appartement chauffé, si l'on place dans la boîte de l'Horloge deux thermomètres, l'un près de la lentille et l'autre près du mouvement ou de la suspension, celui du haut marque parfois 3 à 4 degrés de plus, parce que les couches d'air échauffé s'élèvent naturellement au-dessus des moins chaudes; alors les pendules ne sont pas compensés simultanément dans toutes leurs parties.

1617. Les pignons de rouage sont de 10, vu qu'étant plus simples ils peuvent, avec un diviseur bien exact, ne mener qu'à la ligne des centres, pourvu que les dents des roues tiennent sensiblement du plein, et que les ailes de pignon soient un peu maigres. Ayant soigné ses engrenages sous ce rapport et autres, l'auteur ne trouve aucune différence dans

(1) L'humidité de l'air au dégel se portant sur des corps très-refroidis y reproduit de la glace.

la force des battements de secondes écoutés attentivement pendant des heures entières. *(Pour le pignon d'échappement V. la note, page 479.)*

Le pivot de devant de la roue d'échappement roule dans un pont qui arrive tout près du cadran, ce qui procure un pivot de secondes plus court et moins exposé, dont la roue peut être enlevée sans démonter la cage. Les bouchons de rapport ont le même avantage pour la petite moyenne et pour ménager des pivots délicats, en remontant l'ensemble.

1618. Nous n'avons pas connaissance que les bras de l'ancre aient été autant raccourcis avant les premières pièces de ce genre du même auteur, mais nous ne disons pas que quelque autre artiste capable n'ait pas eu la même idée.

On a vu que la fourchette porte à son extrémité et de côté, une broche sur laquelle est ajustée librement, mais sans le moindre ballottement, une pièce longue et horizontale portant à son milieu la broche cylindrique en acier qui pénètre dans la tige du pendule; l'extrémité de cette pièce se prolonge pour porter un disque mobile mais fixé à la place voulue, pour équilibrer la fourchette et en partie l'ancre, en prenant son point d'appui sur le pendule. Le trou de la tige du pendule est d'abord percé plus grand, puis garni au milieu de sa profondeur d'un bouchon très-court en laiton, n'ayant qu'un 5e de ligne de profondenr, bien tourné et dont l'épaisseur se trouve encore réduite, quant au frottement, par le bercement de ses parois intérieures; on ne l'agrandit en dernier lieu que pour recevoir juste, mais librement, la broche cylindrique d'acier poli qui correspond au milieu ou à la tige de la fourchette. Il n'y a point de ballottement et cependant liberté, ce qui serait impossible sans la pièce mobile et équilibrée; et de plus, son contre-poids prévient l'usure du pivot de ce côté de la fourchette en le soulageant du poids de l'ancre, de la tige de fourchette, de son rappel, etc.

Les deux piliers du bas de la cage ont en dessous une face plate dressée à l'émeri à fleur de la base des platines, pour que le serrage des vis en dessous du support ne fasse pas gauchir les platines. *(La corde du poids pointillé, fig. 2, est trop près du centre.)*

1619. Pour mettre le peu d'huile qu'il faut aux extrémités seulement des dents de la roue d'échappement, l'auteur emploie un moyen aussi simple que certain pour que l'extrême pointe soit seule graissée et que l'huile ne puisse couler ni s'étendre. Lorsque la pièce est en marche, ayant son huile à tous ses pivots, mais les dents de la roue d'ancre étant encore à sec, il graisse la face d'une lame de ressort de Montre redressée convenablement, sur un pouce de long, où l'huile est à peine de l'épaisseur d'un papier fin; puis cette lame étant présentée au-dessous des dents de la roue d'ancre, il y fait toucher la partie la plus saillante des dents pendant une révolution que l'on peut compter, puisque la fourchette est en communication avec le pendule oscillant, le poids moteur étant en action, etc. Ce peu d'huile à la pointe des dents semble disparaître au bout d'une année de marche, et il ne reste que très-peu de gras aux points de contact et qui plus tard semble presque entièrement disparu. C'est ce qu'il faut produire avec des repos et levées en pierre où la pointe des dents ne peut *gripper*, quoique paraissant marcher pour ainsi dire à sec.

Le ressort de suspension, formé exprès d'une seule pièce d'acier divisée au milieu et occupant moins d'espace, permet de rapprocher davantage le pendule de son mouvement, sauf la distance à réserver entre la lentille et le poids descendu à la hauteur de celle-ci. Ce ressort double est enfilé et serré sur son axe supérieur par une cheville, comme il est vu dans la figure, et l'auteur adopte cette disposition très-simple, comme suffisamment solide.

Tout le mouvement est renfermé en dessus et par les côtés entre trois plaques de cuivre qui s'étendent du chevalet jusqu'au cadran. Une autre plaque en dessous est en deux pièces pour le passage de la corde du poids.

La hauteur de la colonne de mercure est de 6 pouces 2 lignes 1/2 de France avec un diamètre de 21 lignes et demie. Lorsqu'on augmente ou diminue la hauteur de la colonne de mercure de 2 lignes, cela produit un effet sur la compensation de 0″, 0225 pour 1° Réaumur; pour 15′ 0″ 4500.

Tout ce que l'auteur nous a généreusement communiqué, dans l'intérêt et l'utilité de l'art, nous paraît parfaitement bien fondé en principes, mais ce qui est encore plus précieux pour la sécurité générale, c'est que l'ensemble se trouve *basé sur des expériences réitérées* dans des climats divers, et non pas sur des idées adoptées au hasard, et publiées inconsidérément sans épreuves suffisantes, comme nous avons eu malheureusement à le faire remarquer trop souvent ailleurs.

Ces remarques partielles pourraient être prolongées bien au delà, si nous n'étions arrêtés par la réflexion que ce que nous venons d'exposer sur ce sujet suffit à indiquer les attentions et les soins exigés pour l'exacte mesure du temps, quand il s'agit de l'appliquer aux sciences physiques. Le surplus, dans un sens toujours utile et conséquent, sera facilement suppléé par les vrais artistes.

1620. Ayant traité dans le chapitre précédent des derniers échappements adoptés dans l'usage actuel, puis du pendule théorique et pratique, on a vu que nous avons exposé à la suite divers moyens de compensation du pendule réel contre les variations de la température, d'après les auteurs les plus accrédités (1). Nous avons laissé de côté bon nombre d'autres constructions dont les unes paraissent entachées de défauts trop importants, tandis que d'autres, plus ou moins ingénieuses, ont été trop peu éprouvées pour obtenir une

(1) Pour les épreuves de température sur l'ensemble, on peut se faire une étuve à peu de frais au moyen d'une caisse de sapin sans couvercle, renfermant le mouvement et le pendule accrochés à un gros mur. Une séparation de tôle au pied de la boîte avec ouverture sur le devant, y contient une lampe à plusieurs mèches, dont deux tuyaux de tôle conduisent la fumée et montent dans les angles, avec réservoir de chaleur dans le haut. Une vitre permet de voir le cadran et son thermomètre, une autre dans le bas laisse voir le limbe des arcs et un second thermomètre. En faisant les épreuves en hiver, on est débarrassé de se procurer de la glace. Il ne faut remplir qu'à moitié le réservoir d'huile de la lampe, pour que sa dilatation ne la fasse pas extravaser, s'enflammer et causer un incendie très-facile à se déclarer avec une caisse chauffée longtemps. Les jointures de la caisse peuvent être closes par de simple papier collé; les bords de la caisse sont garnis d'un rembourrage pour mieux s'appliquer contre le mur, etc. Les autres détails seront aisément suppléés par un habile expérimentateur.

confiance complète ; c'est alors le cas de *s'abstenir*, en s'attachant uniquement aux procédés éprouvés et connus pour approcher le plus de l'exactitude. Maintenant il nous reste à parler des meilleures suspensions du pendule promises à la fin du chapitre ci-dessus.

DE LA SUSPENSION DU PENDULE POUR LES RÉGULATEURS *Et les Horloges astronomiques.*

1621. La suspension d'un pendule régulateur, ou astronomique exige autant de soins et d'attention que les autres parties de l'Horloge de précision. La réunion des perfections de détail, en accord entre elles, est un moyen général de progrès. Il n'importe pas à ceux qui ont besoin d'une mesure exacte du temps de savoir quel est l'artiste inventeur des moyens les plus avantageux ; mais il leur importe de trouver celui qui sait les réunir avec intelligence et instruction. Le titre d'*inventeur* est ambitionné par bien des gens, plutôt pour capter l'attention d'un public aveugle et séduit, avec le bénéfice peu mérité qui en résulte trop souvent, que pour la perfection de l'Art ; celle-ci exige l'emploi de tous les moyens qui peuvent y concourir, quand ils sont publiés et connus. On pourrait annoncer franchement où on les a pris; car il y a souvent autant de mérite à bien choisir parmi tant de constructions diverses, qu'à les avoir imaginées. On doit combiner judicieusement tous les moyens de succès, de quelque part qu'ils viennent, et si l'on en fait une plus heureuse application, on se les approprie en quelque sorte, comme Molière qui, dans un autre genre, disait, en pareil cas, *qu'il reprenait son bien.* Nous ne parlons que des compositions tombées dans le domaine public.

1622. La première suspension à ressort paraît dater de la fin du dix-septième siècle, mais elle était d'abord formée d'une seule lame très-mince, longue de quelques pouces et d'une grande flexibilité que l'on croyait alors essentielle. Ce n'est qu'après une assez longue imitation de cette méthode que l'on adopta définitivement l'emploi de deux lames assez éloignées l'une de l'autre pour retenir constamment le plan de la lentille et de tout l'appareil dans le plan des oscillations. Berthoud se vit forcé d'adopter cette disposition dans ses derniers ouvrages, en place de la suspension à couteau, plus séduisante d'abord, mais qui perd de sa liberté à la longue, soit que, sous la pression de fortes lentilles, l'angle des couteaux s'affaisse s'il n'est pas assez dur, soit qu'il s'égrène s'il est trop dur, soit enfin à raison de son déplacement trop facile dans sa gouttière qui est aussi sujette à se ronger ou à se détruire. L'élasticité naturelle des lames de ressorts trempés et revenus bleu clair lui parut enfin plus avantageuse, outre qu'il y entrevit un moyen d'isochronisme; mais on ne connaît pas de tentatives directes de Berthoud pour vérifier cette propriété, et même il les tenait toujours trop longs pour produire aucun effet sensible sous ce rapport, quoiqu'il les ait amincis en fouet, mais d'une quantité insignifiante. Pierre Leroy, le vrai *Coryphée de l'Horlogerie française*, n'en serait pas resté là, s'il se fût occupé de régulateurs astronomiques.

1623. Ceux qui ont reproché aux ressorts de suspension d'opposer de la résistance aux oscillations et d'exiger un peu plus de force motrice, ce qui est vrai, oubliaient qu'il faut toujours un certain degré de force motrice imprimée au rouage, et plutôt plus que moins,

pour le soustraire mieux à l'influence des huiles, et qu'une force très-faible, telle que nos anciens ont cru devoir l'employer, est absorbée trop facilement par des frottements de degrés variables suivant les diverses températures, et par l'inertie des mobiles, surtout avec les échappements à repos; on a conçu enfin dans ces derniers temps qu'il faut ici un degré moyen de force que l'expérience sait apprécier, afin de produire au delà de l'arc de levée un petit arc supplémentaire d'environ un demi-quart du premier, plus ou moins, suivant la précision et régularité de l'étendue générale des oscillations de chaque Horloge; l'expérience, en un mot, fait admettre aujourd'hui un degré de force d'un moyen terme, mais plus intense qu'on ne croyait devoir le faire précédemment, parce qu'on a vu que trop de faiblesse devient un défaut.

Les premières suspensions à ressorts de Berthoud étant trop chargées de pièces, on les a simplifiées beaucoup, mais l'établissement de ses lames avec des tiges pivotées nous paraît être une bonne idée, qui assure aux ressorts un libre tirage et que l'on pourrait conserver dans plusieurs espèces de suspensions.

1624. Les fig. 1 et 4, pl. XLVII, représentent la première suspension à ressorts de Berthoud vue de côté et de face; *a*, *b* sont les 2 lames des ressorts. Chaque bout de ces lames est rivé à une pièce de laiton K et L, fig. 1re, traversée par un axe, *p* et *q*, mobile sur ses pivots dans les entailles des bras de suspension M M d'une pièce principale formée en croix et en position horizontale. La *traverse* supérieure A du pendule vue de profil, fig. 4, porte deux crochets O O qui assemblent le gril avec une deuxième pièce inférieure ou deuxième croix de suspension N; cette seconde pièce inférieure porte à son milieu une vis P qui sert à la fixer au gril, et dont la tête passe librement au milieu des autres pièces sans pouvoir toucher à aucune partie, lorsque cette vis oscille avec le pendule auquel elle se trouve ainsi fixée. Les ressorts seuls lient les deux croix de suspension l'une à l'autre; celle du bas a deux fourchettes Q R R qui embrassent librement et sans y toucher la croix supérieure, pour garantir seulement les ressorts d'être forcés par une torsion accidentelle. Les parties *n n* portent les pivots des lames de ressort. Les extrémités M I de la croix supérieure permettent à celle-ci de prendre son niveau, en roulant au besoin sur les pivots qui terminent les vis I M portées par les consoles F F fixées à une grande et forte platine de laiton ou étrier qui porte aussi le mouvement. Cet étrier est solidement appliqué à un gros mur par de forts tenons traversant des trous au fond de la boîte sans toucher au bois.

1625. Voici maintenant une suspension plus simple de Martin, élève et chef d'atelier de Berthoud. Ici, fig. 5 et 6, même planche, les ressorts sont pincés dans deux paires de mâchoires de laiton, où leurs extrémités percées sont traversées par les mêmes vis qui serrent ces mâchoires; celles-ci portent en dehors un renflement que traverse un axe d'acier fixé à un côté des mâchoires, et qui passe librement dans l'autre; les tourillons ou gros pivots de l'axe supérieur reposent dans les entailles d'un coq terminé par deux parties, en fourchette, et ceux de l'axe inférieur sont reçus dans les crochets du pendule. On serre modérément les ressorts dans la mâchoire supérieure en les y maintenant à angle droit, ou à l'équerre de sa ligne inférieure horizontale, et de même dans

la mâchoire inférieure avec un serrage très-modéré d'abord. On y accroche le pendule, afin que son poids établisse le tirage égal des deux ressorts, au moyen de quelques oscillations pendant lesquelles on maintient la mâchoire supérieure dans une situation bien horizontale; puis on serre un peu plus les vis des mâchoires en évitant de changer la position des ressorts; alors on décroche le pendule dont la lentille doit être soulevée doucement; enfin ayant délicatement retiré la suspension de dessus le coq, on achève de serrer fortement les quatre vis des mâchoires, sans déranger aucunement leurs lames, qui, étant percées l'une sur l'autre, à distances égales, et ayant leurs tiges de vis de même calibre, maintiendront les côtés droits des mâchoires parallèles entre eux. En raccrochant alors de nouveau le pendule à sa suspension, les lames reprendront leur aplomb par la facilité que les axes de même grosseur ont de tourner de la quantité voulue dans les crochets du coq et du pendule, où ils resteront dans une position fixe après un petit nombre d'oscillations. Deux brides latérales de précaution, fixées par une vis à la mâchoire supérieure, en descendent pour embrasser, par leurs anneaux du bas, la partie la plus forte des tourillons de la mâchoire inférieure, sans y toucher, vu la grandeur suffisante de ces anneaux et l'écartement des brides, comme il le faut pour la liberté des oscillations. On pourrait aussi modifier la forme des mâchoires pour y établir le pivotement avantageux des lames de la suspension de Berthoud.

1626. Les lames de ces deux auteurs, nous l'avons dit, sont toujours trop longues, ayant 8 lignes environ de longueur sur 3 à 4 lignes de largeur. Berthoud en diminuait l'épaisseur vers le bas, en les tenant en fouet, c'est-à-dire plus minces d'environ un 50° de ligne, quantité insignifiante pour l'isochronisme. On ne leur laisse pas aujourd'hui plus de 2 à 3 lignes de longueur au dehors des mâchoires, avec une épaisseur égale de lame.

1627. En tenant les ressorts de suspension beaucoup plus courts dans certaines constructions particulières, M. *Winnerl*, que nous avons consulté à ce sujet et qui a bien voulu nous le communiquer, garnit ses mâchoires faites de laiton avec des plaques et autres parties d'acier, pour en consolider le serrage et prévenir le refoulement du bord du laiton par l'effort répété de lames de ressort extrêmement courtes, c'est ce dont nous parlerons ailleurs; notre fig. 7 n'en est qu'une imitation incomplète, et simplifiée pour l'usage ordinaire. On voit dans les développements, fig. 8 et 9, qu'un côté de la mâchoire supérieure fait partie et corps avec la plaque supérieure, et que l'autre côté, formé d'une pièce à part, est rapproché de la première par le serrage des deux vis qui traversent aussi les ressorts. Les mâchoires sont garnies d'une lame ou plaque intérieure d'acier indiquée dans la gravure par le double trait. La grande plaque supérieure *a* repose sur deux supports du chevalet indiqués au pointillé, fig. 7, et y est fixée par deux vis et deux pieds dans les angles diagonalement opposés; le reste est facile à concevoir par les parties de développement, fig. 8 à 11. Ces figures de demi-grandeur ne sont ici qu'une simplification de la construction originale de l'auteur plus recherchée et d'une disposition parfaitement raisonnée, comme tous les ouvrages de cet artiste distingué qui, indépendamment de ses pièces marines d'une excellente marche, s'occupe avec succès des Horloges astronomiques et de

quelques régulateurs d'appartement, auxquels il donne des dispositions particulières bien entendues et tous les soins réfléchis et si rarement réunis que chaque pièce exige.

1628. D'après les diverses constructions qui précèdent et peuvent suffire, on peut choisir le mode le plus convenable à chaque pièce, en y portant, comme nous l'avons dit, tout le scrupule voulu, puisque la suspension bien établie est très-importante pour la liberté des oscillations, et que, comme nous ne saurions trop le répéter, pour quelques-uns du moins, la perfection de chaque partie de détail, en accord avec les autres, contribue puissamment au succès du régulateur astronomique, qui, dans ce seul cas, devient en quelque sorte le *nec plus ultra* de l'Horlogerie exacte.

1re Obs. On a dit ci-dessus que dans les suspensions de Berthoud et de *Martin* les ressorts sont beaucoup trop longs : il est facile de disposer la dernière sans beaucoup de changements, de manière que les ressorts n'y aient que deux à trois lignes au plus de longueur entre les mâchoires, comme on l'a déjà recommandé. Les fig. 7 à 11 peuvent, dans leur proportion actuelle, servir aux pendules à secondes et autres pièces d'appartement, mais avec lentille plus pesante que d'ordinaire, tandis qu'il faudra en doubler toutes les dimensions pour un régulateur à seconde entière, ou, autrement dit, *Horloge astronomique* (1).

2e Obs. L'exécution détaillée et l'explication des effets du gril à 9 verges doivent servir de guide à toutes les autres dont la figure en petit ne permet pas tous les détails; l'intelligence avertie saura aisément y suppléer; c'est pourquoi nous n'avons pas donné la figure du gril à 5 verges, *dont deux sont en zinc*, comme superflue. Quant à celle à 5 verges avec *une seul en zinc*, rencontrée plus rarement, nous l'avons représentée comme variété du genre moins connue et praticable au besoin, mais exigeant plus que l'autre le ressort auxiliaire en hélice du haut, pour soulager la *seule verge en zinc*, quoique tenue d'ailleurs d'un diamètre presque double de celui des verges d'acier. Les trous de rechange des trois verges du milieu pour régler la correction et la petite traverse, indiqués par erreur dans le bas de la figure 2, doivent être remontés et placés immédiatement au-dessous de la traverse générale *c* du tiers inférieur du gril, et même, au besoin, cette grande traverse pourrait tenir lieu de la petite supprimée, si la hauteur de correction s'y rencontrait; il suffirait alors de pratiquer à la grande traverse les trois trous des chevilles à têtes moletées, et l'on aurait soin de ne pas la cheviller aux deux verges d'acier du dehors, puisque dans ce cas son glissement devrait y être libre (2). Ces variétés de disposi-

(1) Depuis quelques années plusieurs Horlogers-penduliers ont inventé différentes suspensions plus ou moins simples. Nous pouvons citer celle de M. Haine (inventée en 1845), qui, à elle seule, produit l'effet des diverses autres, mais avec plus de sûreté et de simplicité.

(2) La réduction du gril à une seule verge de zinc *tirée* fut appliqué, pour la première fois à notre connaissance, par feu *Bourdier* père, très-habile praticien, chargé de l'exécution d'un régulateur à *double pendule*, dont chacun était disposé pour se diviser et se décrocher en trois parties, afin d'être emballé avec le mouvement double aussi et restant fixé à son étrier. Ce fut l'exigence inutile de ce démontage qui détermina *Bourdier* à cette distribution des verges de son gril avec *une seule en zinc*, pour la facilité de leur accrochement; mais il résultait de cette division du pendule en trois parties un plus grand nombre de traverses et des frottements de plus dans les effets de compensation. Ce n'était pourtant que le moindre défaut de ces pièces à deux pendules qui se croisent dans leurs oscillations.

tion des parties d'un gril ne doivent être néanmoins tentées que par ceux qui sont certains de bien entendre le mécanisme et les effets physiques d'une compensation; car il ne suffit pas d'employer les longueurs données des tables de dilatation, il faut encore s'assurer de la marche de l'ensemble (du pendule avec son mouvement) dans l'étuve, tant au froid qu'au chaud; expérimenter si les métaux neufs employés répondent à ceux des tables anciennes; si les moyens de correction ont été suffisamment réservés; si les parties ne cèdent pas mécaniquement à la pression, ou si leur effet n'est pas réduit par les frottements, ou par le poids de la lentille qui, pour cette raison, doit être modéré. En effet, l'on remarque déjà qu'avec les grils plus particulièrement, les effets du calorique s'opèrent par sauts, et que, indépendamment des frottements, le mouvement des métaux est facilité dans un sens et contrarié dans l'autre; d'où les effets du même degré de chaud et

Bourdier composa aussi le mouvement double de la même pièce avec cylindre cannelé en dehors des platines, et ressort auxiliaire, dont toute la disposition lui appartient, et résolut avec beaucoup d'intelligence les difficultés qu'entraînait l'idée bizarre et hasardée d'une Horloge à pendule double; mais il n'était pas responsable du résultat, qui, ainsi que tant d'autres idées aventurées du même auteur, n'eut pas de succès; car deux Horloges astronomiques de ce genre furent exécutées, chacune différant de l'autre par l'échappement et la suspension, et toutes deux eurent toujours une marche fort inférieure en exactitude à celle d'une bonne Horloge simple. Néanmoins, cette composition vicieuse, publiée avant d'avoir subi de suffisantes épreuves, prônée par des amateurs séduits, fut acquise par de hauts personnages, et imitée par quelques copistes, tandis que, comme il est arrivé souvent en pareil cas, l'auteur désabusé se voyait forcé de supprimer en secret, à ses frais, des moyens défectueux, sans oser en convenir.

C'est avec le même travers d'esprit qu'avait été composé quelque temps avant un Chronomètre de poche à deux mouvements, dont on espérait une influence mutuelle pour réduire de moitié la latitude des légères irrégularités inévitables dans les instruments de ce genre. Mais les bases et motifs de cette disposition ne prouvaient qu'une ignorance complète des premières notions de physique et de mécanique. Cependant, dans les premières épreuves, les mouvements s'accordant quelque temps à battre ensemble, offrirent un avantage éphémère, dû à une cause accidentelle à laquelle on ne pensait pas. Il fut d'abord démontré que les causes auxquelles l'auteur attribuait cet accord momentané ne pouvaient le produire; mais il fallut qu'un savant et profond théoricien, M. de Laplace, expliquât à l'auteur la véritable cause de cet accord momentané, qui était l'ébranlement du support commun que l'auteur avait produit sans y penser. Or, comme la régularité accidentelle n'avait lieu que pour un temps incertain, très-limité, réduit souvent à 8 ou 15 jours, et exigeait, chaque fois qu'elle cessait, une correction en sens contraire de la correction précédente, et qu'il fallait chaque fois, en retouchant aux masses de compensation et de réglage, détruire ce qu'on avait fait avant, ce qui annulait l'avantage si peu durable obtenu par hasard, il fallut définitivement y renoncer. En Horlogerie, les erreurs des compositions nouvelles trop peu méditées sont si faciles et fréquentes, que l'on ne doit compter sur le succès qu'après bien des observations et la longue sanction du temps et de l'expérience. Il y a souvent imprudence et même témérité à s'élever au-dessus de sa sphère; mais il y a démence ou aveuglement complet chez celui qui s'avise d'employer dans l'Horlogerie les principes d'une science dont il n'a pas les premières notions, et qu'il applique de travers pour en avoir mal entendu quelques citations insuffisantes. C'est alors que, voulant s'élever trop haut sans moyens proportionnés, on éprouve le sort d'*Icare*. Et même généralement, dans les cas les plus ordinaires, on devrait toujours avoir présent à l'esprit l'ancien proverbe, qui défend au cordonnier d'élever son jugement plus haut que la chaussure; le principal défaut de l'ignorance est de ne pas savoir douter. Il est permis sans doute d'essayer pour soi ce que des conjectures probables et bien examinées semblent promettre, mais, à moins que l'on ne veuille spéculer en fraude sur la crédulité et l'ignorance, on ne doit publier ses travaux qu'après des succès bien constatés par de suffisantes épreuves; autrement ce n'est qu'un calcul d'ambition sans moyens réels.

de froid n'y sont pas proportionnels : c'est ce qui a ramené depuis quelques années à la compensation de *Graham* par le mercure, vu que, par sa fluidité, cette espèce de métal obéit plus facilement aux impressions de la température, indépendamment de plusieurs autres avantages de la construction, etc. Nous ne parlons ici que d'approcher le plus possible de la perfection absolue, mais idéale, puisqu'il n'y a rien de parfait dans les travaux de l'homme, ni même dans ceux de la nature relativement à nos idées, et que, s'il n'y a point de zéro ou d'équilibre parfait dans l'Horlogerie, on peut en dire autant de tout le reste, lors même que le temps et les moyens ne permettent pas encore de s'en apercevoir (1).

1629. Les pièces d'Horlogerie d'une véritable *précision*, expression envahie par les charlatans, depuis que l'idée en est répandue dans le public, ces pièces, disons-nous, établies véritablement avec les soins et les moyens nécessaires, telles que le sont celles astronomiques, marines et Chronomètres portatifs, exigent des observations au moins aussi exactes, pour que l'artiste puisse connaître et modifier au plus près leur marche diurne, etc. C'est, la plupart du temps, sur une *ligne méridienne* verticale ou horizontale que l'on prend l'heure du midi vrai ou solaire et inégale, corrigée par la *table d'équation* diurne et annuelle, pour en conclure le midi moyen et uniforme. Mais ce moyen produit par lui-même trop d'incertitude et ne donne l'instant observé du midi vrai qu'à 5 ou 10 secondes près, suivant les dimensions ordinaires des gnomons, même pour les observateurs les plus exercés ; à moins que l'on ait à sa disposition l'un de ces grands gnomons que nous avons cités (paragr. 472, et suiv.), mais qui sont trop rares ; et encore, les meilleures observations qu'on en obtient laissent une à deux secondes d'incertitude à cause de la *pénombre* dont les bords toujours *fondus* sont plus ou moins incertains. L'observation des étoiles avec une *lunette murale*, à réticule, donne déjà plus de précision. Cependant, outre sa sujétion aux seules observations de nuit, cet instrument, qui donne le retour du méridien terrestre sur une même étoile, que l'on corrige de son accélération diurne par les tables qui la concernent, ne donne pas du tout le midi absolu moyen, que

(1) Dans le calibre ci-dessus de M. *Kessels*, le nombre des dents de la roue petite moyenne n'a été noté dans la gravure qu'à 75, menant le pignon d'échapp. de 10 ailes pour y produire 7 tours 1/2 de la roue d'échappement, suivant l'usage ; mais, dans nos rapports ultérieurs avec l'auteur, nous avons eu à remarquer qu'il donne à cette petite moyenne 90 dents, menant un pignon d'échappement de 12 ailes, et produisant également les 7 tours et demi voulus pour la roue d'échappement. C'est ce que des nombres du plan général, marqués au crayon et en partie effacés, ne nous avaient pas laissé distinguer. Nous en prévenons ici, quoique ces différences de nombres n'en introduisent aucune dans les révolutions. Cependant nous préférons le pignon de 12 de l'auteur, surtout près de l'échappement, vu que, si le pignon de 10 peut bien arriver, avec les précautions indiquées dans nos articles sur ce sujet, à n'être mené qu'à la ligne des centres, ou même quelque peu après, on est toujours plus certain de cette propriété avec le nombre de 12.

Nous avons fait exécuter, il y a déjà plusieurs années, par *Audemar*, le plus habile *blanctier du pays de Vaud* à cette époque, deux calibres de Montre de poche d'une distribution particulière, mais de bonne et solide dimension usuelle, où tous les engrenages, y compris celui d'échappement, sont établis avec un pignon de 12. Nous comptions d'abord fournir au blanctier des pignons de Paris de feu *J. J. Sandos*, mais ils ne furent pas nécessaires, vu que les petits pignons de Montre s'exécutaient déjà en Suisse avec la plate-forme, c'est-à-dire beaucoup plus exactement qu'*à la main*.

l'on ne peut conclure, comme il vient d'être dit, que du temps solaire, parce que la lunette murale ordinaire ne peut être dirigée à volonté vers les diverses hauteurs du soleil, et ne comporte pas les moyens de la placer exactement dans le méridien. Le grand quart de cercle mural des observatoires n'y est pas même propre, car, malgré tous les soins, il s'écarte encore du méridien de plusieurs secondes, et n'offre de précision que pour la *hauteur* seule des astres, à laquelle il est spécialement destiné, et vers l'instant de leur passage au méridien. Il ne reste à l'artiste que la communication directe avec un observatoire qui puisse lui procurer le midi moyen absolu ; or ce genre d'établissement n'existe guère que dans les grandes capitales. Enfin, le véritable moyen d'avoir à sa portée, à la fois, le midi absolu et la révolution diurne tant du soleil que des étoiles, est la possession et l'établissement chez l'observateur, de l'instrument que l'on appelle *Lunette méridienne* ou *Instrument des passages*, qui obvie à toutes les difficultés, et s'emploie aussi à diverses autres observations astronomiques; mais un bon instrument de ce genre est une acquisition dispendieuse, outre même la rareté de sa bonne qualité. Nous saisirons néanmoins cette occasion d'en donner une première idée à nos lecteurs, parce que la connaissance et l'usage de cet instrument, le plus simple et le plus parfait de tous, fournit à plus forte raison toutes les remarques à faire sur l'usage des autres moyens bien moins avantageux.

1630. La *Lunette méridienne* ou *instrument des passages*, que l'on verra figurée succinctement et annoncée dans l'une de nos dernières planches, est composée d'un tube de laiton mince et léger, mais assez solide, d'environ 4 pieds de longueur sur 24 à 30 lignes de diamètre, formant une lunette astronomique (c'est-à-dire renversant les images) avec micromètre ou réticule ; elle est montée à angles droits sur un axe dont les pivots sont terminés avec grand soin sur le tour ; le corps de l'axe, de forme très-conique, réunit aussi la roideur et la légèreté. Cet axe, destiné à conserver l'horizontalité la plus exacte, repose par ses deux extrémités ou pivots, en alliage dur et cassant, très-régulièrement tournés et polis, sur deux coussinets angulaires scellés dans deux blocs ou montants de pierre dure que leur poids et de solides fondations doivent maintenir dans une parfaite immobilité. On conçoit que l'axe optique de la lunette tournant ainsi sur son axe horizontal, qu'elle coupe à angles droits, doit décrire dans l'espace un plan vertical, c'est-à-dire perpendiculaire au plan de l'horizon, mais dont la direction pourrait être appliquée aux divers points de ce même plan. Parmi toutes ces directions, une seule est obligée, afin que tous les astres sur lesquels le champ de la lunette est élevé passent dans le plan vertical de son axe optique, à l'instant de leur plus grande hauteur (et aussi de leur plus petite pour les circompolaires visibles) ; et comme tous les astres nous semblent marcher aussi d'un mouvement commun, par le seul effet du mouvement de rotation diurne de la terre, il suffit de trouver la direction voulue de la lunette pour un seul d'entre eux. Or, le soleil, vu l'inégale longueur des ombres occasionnées aux divers instants du jour par des corps fixés à la terre, offre d'abord un moyen, sinon des plus exacts, au moins très-simple, de donner par approximation à la lunette méridienne sa direction voulue.

1631. On y parvient en établissant d'abord à portée une méridienne horizontale plutôt plus grande que moins, du genre de celles décrites dans nos articles de gnomonique, tome Ier, page 295 et paragraphe 434 et suite, et dans plusieurs autres ouvrages auxquels nous devons renvoyer. La méridienne horizontale tracée sert à établir des fils à plomb sur ses extrémités, dans le plan de rotation de la lunette, ou bien on y emploie d'autres moyens analogues, etc. C'est alors seulement que l'on fixe invariablement dans les deux piliers ou montants de pierre les supports des coussinets qui reçoivent les pivots de l'axe de rotation, et ont été déjà l'objet d'une disposition et préparation dans ce but; on achève de rendre cet axe bien horizontal au moyen d'un niveau d'épreuve particulier et d'une des vis de rappel, etc., faisant partie des accessoires obligés de l'instrument, en sorte que le fil du milieu de la lunette méridienne, tournant sur son axe horizontal, décrive déjà à très-peu près le plan du méridien; des observations astronomiques achèvent de régler la situation de l'instrument.

1632. Le *réticule* de la lunette se compose d'un bout de tube traversé par 3 fils verticaux qui partagent le champ de la lunette en quatre espaces égaux; ils sont croisés tous trois à angle droit dans le milieu de leur hauteur par un quatrième fil horizontal. Quelques grands instruments portent même cinq fils verticaux; mais comme la vitesse apparente de l'astre y augmente en proportion d'un plus fort grossissement, le champ y diminue, et la distance des fils réduite à proportion y laisse moins de temps entre les contacts observés; il y est plus difficile d'en prendre note. La multiplicité des fils a pour but de permettre plusieurs observations du même passage, dont les valeurs additionnées et le produit divisé par le nombre des fils donnent un terme moyen dont on conclut l'époque unique du passage par un seul fil milieu et en quelque sorte idéal, mais d'autant plus exact, etc. Trois fils seulement sont beaucoup plus commodes pour les observations solaires : car avec les corps célestes qui offrent dans la lunette un disque appréciable, on ne peut connaître le passage des fils sur le centre de l'astre qu'au moyen d'une double observation pour chacun : celle du contact du premier bord du disque avec un fil, et celle de la séparation du deuxième bord d'avec le même fil, en partageant par un calcul ultérieur leur différence par moitié, pour soustraire le temps de celle-ci du premier bord, ou l'ajouter au deuxième bord, afin d'en conclure le passage du fil sur le centre de l'astre : ces doubles époques sur cinq fils s'interposant réduisent d'autant la latitude de temps employée à en prendre note; mais avec trois fils plus écartés on a plus de temps. Cependant la méthode, l'expérience et l'usage apprennent à surmonter ces difficultés assez gênantes dans les premiers essais. L'instrument est disposé pour recevoir un double verre noirci, dressé exprès parfaitement plan, dont la monture glisse au besoin dans une rainure en avant du premier oculaire; précaution indispensable pour préserver l'œil nu contre l'activité de la lumière du soleil augmentée à proportion du grossissement ou amplitude optique; danger qu'il est ainsi facile d'éviter. Toute la longueur du verre dont il s'agit n'est noircie que par degrés pour y choisir le point où la lumière de l'astre ne fatigue nullement la vue (1).

(1) Les observations du soleil avec les grandes *armilles* ou cercles divisés des anciens temps, où

1633. L'observation des étoiles est la plus facile, attendu qu'elle n'exige qu'une seule observation sur chaque fil, qui produit l'occultation instantanée et complète : et comme il y a au moins 60″ d'intervalle, et même plus entre les occultations, on a tout le temps de noter la seconde et sa fraction, connues par un Chronomètre tenu à l'oreille, puis de reprendre avec la loupe la marche de l'aiguille des secondes, de reporter le chronomètre à l'oreille, en continuant d'en compter les battements, en ramenant de suite l'œil à l'instrument, pour observer l'occultation suivante; on n'y a pas besoin de verre noirci ou de matière obscure. *Un rappel donne le mouvement horizontal. On peut observer plusieurs étoiles dans la même soirée.*

Les étoiles sont si prodigieusement éloignées de la terre, que les plus forts télescopes ne parviennent pas même à en amplifier le disque réduit à un point imperceptible par l'éloignement, quoique l'activité propre de la lumière et la sensibilité de la vue nous les fassent néanmoins encore apercevoir. Cependant ces étoiles ont véritablement un disque, puisqu'elles sont reconnues être autant de soleils disséminés dans l'espace et que l'on considère généralement comme les centres d'autant de systèmes planétaires plus ou moins analogues au nôtre. Nos *Planètes*, qu'à la vue simple le vulgaire confond avec les étoiles, étant des terres comme la nôtre, simplement éclairées par notre soleil, sont considérablement moins éloignées que les étoiles ; alors ces planètes, quoique encore fort loin de nous, ont leur disque sensiblement grossi par les instruments d'optique, et la *Lune* surtout, qui n'est qu'à 66 mille lieues de la terre, terme moyen, nous laisse apercevoir avec le télescope ses montagnes et ses cratères de volcans, dont le même côté vu constamment paraît presque criblé ; *Jupiter* nous montre ses bandes alternativement claires et obscures ; *Vénus* ses phases, etc. Mais les étoiles les plus brillantes, à raison de leur prodigieuse distance, comparativement, n'offrent dans le télescope qu'un point d'autant plus réduit que l'instrument grossit davantage, parce que son effet est d'absorber une grande partie des rayons d'irradiation produits tant par la réfraction atmosphérique que par l'ébranlement des parties voisines du point principalement affecté de la rétine, dont l'effet se confond avec le vrai point central lui-même et nous fait paraître les étoiles plus

les lunettes et leurs *réticules* n'étaient pas encore inventés, se faisaient à l'œil nu et avec des *pinnules* élevées verticalement sur les extrémités de grandes *alidades* mobiles. Ces instruments donnaient des erreurs de plusieurs minutes de degré, tandis que celles modernes ne dépassent pas une seconde.

L'observation à l'œil nu a rendu aveugles, sur leurs derniers jours, plusieurs anciens astronomes, par suite d'opérations de ce genre trop répétées ou prolongées sur des corps très-lumineux. Cependant nous avons observé quelquefois le soleil à l'œil nu daus notre jeunesse sans en avoir eu la vue affectée par la suite ; mais il y faut beaucoup de modération : il est même mieux de s'en abstenir, car des vues trop sensibles pourraient en être blessées ; au lieu que, avec un verre noirci ou de composition obscure, comme on en a généralement aujourd'hui, son degré pouvant être essayé et choisi, il n'y a aucun danger ni inconvénient, même avec les plus forts grossissements.

L'observation solaire est indispensable pour avoir avec précision l'instant du midi du lieu où l'on opère, comme point de départ, pour observer et calculer les *longitudes*. On trouvera plusieurs renseignements sur ce sujet dans le grand *Traité d'Astronomie* de *Lalande*, dans le *Voyage* en mer du chevalier de *Fleurieu* pour les Montres marines de *Berthoud*, dans celui de *Cassini* pour les pièces marines de *Pierre Leroy*, qui mérita les premiers prix doubles, dans le *Traité d'Astronomie* de M. *Biot*, etc.

grosses à l'œil nu. Les étoiles les plus brillantes n'offrent donc dans la lunette qu'un point si petit et si affaibli, qu'il ne peut offenser la vue. D'ailleurs on ne choisit pas celles-ci pour les observations dont il s'agit, mais celles dites de 4e à 5e grandeur, dont l'occultation est aussi plus subtile, plus instantanée. Celles de 7e à 8e grandeur et au-dessous seraient sujettes à disparaître par des temps un peu nébuleux.

1634. Pour aider à distinguer les fils du réticule sur un ciel naturellement obscur, bien que dégagé de vapeur, et être averti du moment d'occultation de l'étoile, l'instrument porte en dehors, au delà de son objectif, un réflecteur de forme ovale, percé et incliné suivant un angle qui peut être varié au besoin; il est garni d'un papier blanc collé, sur lequel est dirigée la lumière d'une petite lanterne portée par un des piliers en pierre de l'appareil; la réverbération qui en résulte dans le champ de la lunette donne une teinte d'un gris plus ou moins clair au fond du ciel, sur lequel se distinguent alors les fils du réticule, en même temps que l'étoile.

Il est avantageux, pour la facilité des observations, que la lumière de la lanterne ne soit reçue que par le réflecteur, et qu'on puisse seulement en obtenir quelques rayons séparés, sur le cadran du Chronomètre ou du compteur. Toute autre partie éclairée de la pièce où l'on observe ne peut que nuire à la netteté de l'observation, et pour cela on en peint souvent le plafond et les parois en noir ou de quelque couleur très-foncée. Nous ajouterons à la description précédente de notre lunette méridienne que ses coussinets peuvent aussi se placer contre des bois de charpente, au moyen de vis à bois d'acier faites exprès, pour remplacer les vis ordinaires de laiton qui les attachent aux goujons en laiton scellés dans les deux piliers, ou au besoin dans les deux montants d'une fenêtre ordinaire. Mais avec les bois plus perméables à la température et aux effets hygrométriques, cet ajustement nécessite impérieusement une vérification immédiate de l'instrument avant chaque observation. On trouvera encore des détails utiles sur cette matière dans les *Lettres sur l'Astronomie*, par M. *Darquier*, in-8°, chez Didot, 1786, *indiquées par M. de Lalande*.

1635. Le retour du méridien terrestre sur la même étoile s'accélérant chaque jour sur le temps solaire moyen de près de 4 minutes (3′ 55″,9), l'étoile qui passait au commencement des observations à 10 ou 11 heures du soir finit au bout d'un mois par se trouver dans le champ de la lunette environ 2 heures plus tôt; on peut même l'observer pendant la majeure partie du crépuscule; on n'a plus besoin du réflecteur, le ciel étant assez éclairé pour distinguer les fils et l'étoile dont on connaît d'avance l'instant de retour; l'observation n'en est que plus facile et même plus agréable. Lorsque l'étoile arrive dans le champ de la lunette avant le coucher du soleil ou trop peu de temps après, comme elle est choisie parmi celles de moyenne grandeur, pour peu que le temps se couvre ou se charge de vapeurs, on la distingue mal, et alors on en attend une autre vers onze heures ou minuit. C'est presque toujours du côté du midi et alors vers l'équateur, ou dans une direction d'environ 45° vers l'horizon qu'il faut diriger la lunette, parce que vers cette zone les étoiles ont un mouvement apparent plus rapide. Nous n'avons pas parlé jusqu'ici des petites variations que peut avoir la rencontre du plan du méridien terrestre avec l'étoile, quoiqu'il y en ait une produite par plusieurs causes, telles que la *nutation*,

l'*aberration*, les variations d'*ascension droite*, etc., parce que, en un mois, ces effets, calculables en effet, sont trop peu sensibles pour le réglage des pièces mêmes de précision. Quant au mouvement diurne de la terre, les astronomes s'accordent à ne pas trouver d'altération dans sa durée de 24 heures solaires, temps moyen, depuis les plus anciennes observations astronomiques. Mais nous terminerons là ces détails que les artistes et amateurs trouveront plus étendus et peut-être plus clairs auprès de quelque astronome *bienveillant*, et dans les éléments de la science où l'on explique la manière de s'habituer aux observations et de régler la vraie position de l'axe optique d'une lunette méridienne, au moyen, soit de l'étoile polaire, soit des étoiles circompolaires qui se trouvent au méridien deux fois en 24 heures, et dont la révolution peut être partagée en deux parties exactement égales, au moyen d'une bonne Pendule à secondes réglée, soit encore par l'usage du quart de cercle mobile et des hauteurs correspondantes du soleil ou d'une étoile, ou par les hauteurs absolues du même astre, etc.; nous ajouterons seulement que, immédiatement après le réglage définitif de la position d'une lunette méridienne, il faut remarquer sur quelque édifice solide qui se trouve dans sa direction, au midi ou au nord, et de ces deux côtés, s'il se peut, l'une des divisions d'un limbe placé à l'avance sur cet édifice, sur laquelle tombe alors le fil milieu du réticule, et en prendre note pour y ramener plus aisément et promptement la lunette, toutes les fois qu'on en fait la vérification au moyen du retournement des pivots d'un coussinet à l'autre, et de l'application du niveau sur ces mêmes pivots, etc. Près de terminer cet ouvrage, il ne nous reste plus assez d'espace disponible pour entrer dans ces détails; nous sommes même forcés de renoncer à l'exposition de quelques notions générales sur notre système planétaire auxquelles le lecteur suppléera au moyen des ouvrages connus, tels que divers traités sur ce sujet, et la petite bibliothèque des sciences et arts de M. Ajaçon de Grandsagne (partie astronomique livrée séparément), et autres ouvrages spéciaux. C'était dans l'intention de donner un aperçu très-succinct de notre système (arrangement, ordre) planétaire, que nous avions commencé à utiliser un espace vide de notre planche 33, où, sous la désignation de *Supplément de Gnomonique*, nous avons figuré (en perspective, et alors par une courbe très-ovale) l'orbite annuelle presque ronde décrite par la terre autour du soleil, pour représenter son mouvement annuel de translation indépendant de sa rotation diurne sur son axe qui conserve toujours son parallélisme. Cette figure était destinée à indiquer la cause des saisons; celle-ci est principalement produite par le plus ou moins de perpendicularité des rayons solaires sur les parallèles ou zones terrestres qui, ainsi que l'équateur terrestre, se présentent plus ou moins directement à l'action solaire, suivant la position de l'axe terrestre sur les différents points de son orbite. Car cet axe passant par les pôles, toujours oblique et parallèle à lui-même, et conservant sa même inclinaison sur l'orbite annuel de la terre, il s'ensuit qu'annuellement, sous un même méridien, toutes ses zones ou parallèles se présentent plus ou moins obliquement aux rayons du soleil, en sorte que chaque pôle est, dans son hiver, plus d'un mois sans voir lever cet astre, et le voit aussi dans son été plus d'un mois sans qu'il se couche pour ce pôle. C'est plus particulièrement l'obliquité des rayons solaires qui change la température des saisons, que la

distance différente du soleil à la terre. En effet, pendant que nous éprouvons l'hiver, la terre est, au contraire, un peu plus près du soleil que pendant l'été ; mais ce rapprochement peu sensible sous le rapport de la température, est loin de compenser le refroidissement de la surface terrestre par la faiblesse des rayons solaires, obliques pendant notre hiver. On se procurera aisément ces notions plus détaillées dans les ouvrages spéciaux qui traitent ce sujet. Nous terminerons donc ici ces remarques par quelques indications sur la manière d'*observer* avec la Pendule ou le Régulateur à secondes, ou avec le Chronomètre de poche, ou enfin avec un *compteur* quelconque, soit à l'oreille, soit à la vue aidée d'une loupe pour les subdivisions.

1636. Pour compter les battements de l'un des instruments d'Horlogerie dont il s'agit, il est utile de s'habituer à un calcul de tête très-simple qui n'exige que de l'égalité dans les intervalles et une vitesse proportionnée à la subdivision des parties du temps. Nous ne prétendons pas ici diriger les artistes et observateurs exercés qui se sont fait une méthode qu'ils préféreront avec raison, vu l'habitude qu'on ne peut trop en contracter, quand elle est bonne ; mais pour ceux qui commencent et pourraient s'y trouver embarrassés, nous avons cru devoir donner quelque idée, autant qu'il est possible de la décrire, de celle que nous nous sommes créée par le seul sentiment du besoin. Nous ne la donnons pas comme la meilleure, mais comme praticable pour quelques-uns, faute de mieux, et parce que nous l'avons vue depuis approuvée et employée par des observateurs plus habiles que nous.

Ainsi, pour la seconde entière, intervalle plus facile à observer, comme plus long, il faut compter, à partir, soit de 0 ou 60, soit d'une autre dizaine quelconque, 1, 2, 3, 4, etc., jusqu'à 10 seulement, puis reprendre 1, 2, 3, 4, etc., et cette fois, en place de 10, nommer 20 ; ensuite, à la 3e dizaine, nommer *-tente* (pour 30) ; à la 4e dizaine, nommer *-rante* (pour 40) ; à la 5e dizaine, nommer *-quante* (pour 50) ; et à la 6e dizaine, nommer *-ssante* (pour 60). Car il faut s'habituer à ne prononcer même dans ces premiers cas que des monosyllabes, à cause des autres cas plus rapides.

Avec les compteurs à demi-secondes, les deux coups étant également battus, le 1er coup de la demi-seconde se compte toujours *un;* ainsi l'on compte *un* 1, *un* 2, *un* 3, *un* 4, etc., jusqu'à *un* 10 ; puis, recommençant par *un* 1, *un* 2, etc., on arrivera de la même manière à *un* 20 ; à *un -tente* (pour 30 ; *un -rante, un -quante, un -ssante.*

1637. Avec le chronomètre de poche à 18,000 vibrations par heure et qui donne 5 battements par seconde, on compte de suite 1, 2, 3, 4, *un;* 1, 2, 3 4, *deux;* 1, 2, 3, 4, *trois;* 1, 2, 3, 4, *quatre;* 1, 2, 3, 4, *cinq;* 1, 2, 3, 4, *six;* 1, 2, 3, 4, *sept;* 1, 2, 3, 4, *huit;* 1, 2, 3, 4, *neuf;* 1, 2, 3, 4, *dix;* puis on recommence par 1, 2, 3, 4, *un;* 1, 2, 3, 4, *deux*, etc., jusqu'à 1, 2, 3, 4, *vingt;* puis à la suite, pour les dizaines, ...1, 2, 3, 4, *-tente;* ....1, 2, 3, 4, *-rante;* ....1, 2, 3, 4, *-quante;* ....1, 2, 3, 4, *-ssante.*

1638. Avec les échappements dits *à coup perdu*, tels que l'échappement libre à cercle et détente, ou autre, dont l'aiguille ne bat et où l'oreille n'entend qu'un coup sur deux, l'observation est un peu moins aisée d'abord, mais on s'y habitue encore assez facilement. Les vibrations du balancier y sont toujours de 18,000 par heure, ou 5 vibrations par

seconde. Mais comme il y a un coup nul ou perdu de deux en deux, chaque battement de l'aiguille y vaut deux cinquièmes de seconde. En sorte que l'aiguille, à partir de la division 0 ou 60, par exemple fait son 2e battement avant la 1re division suivante, et que son 3e battement répond un peu au delà ; enfin qu'elle ne bat juste sur les divisions que de deux en deux coups. Ainsi, avec ces échappements à coup perdu et cependant toujours à 18,000 vibrations du balancier par heure, à partir du zéro ou 60, ou d'une dizaine quelconque, on comptera 2, 4, 6, 8, *deux;* 2, 4, 6, 8, *quatre;* 2, 4, 6, 8, *six;* 2, 4, 6, 8, *huit;* 2, 4, 6, 8, *dix*. Puis, à la fin de la dizaine suivante, 2, 4, 6, 8, *vingt;* puis 2, 4, 6, 8, *-tente*, *-rante*, *-quante* et *-ssante*. A chaque minute on peut ouvrir ou lever un doigt de la main fermée, si elle est libre, etc.

Quelques Chronomètres de poche ont parfois 21,600 vibrations par heure, et par suite 6 vibrations par seconde, pour les garantir encore plus sûrement des secousses ou cascades du porter, surtout à cheval. Mais comme ils sont toujours avec échappement libre et à coup perdu, leur aiguille bat trois coups d'une division à l'autre. L'observation y est très-facile, et plus peut-être qu'aucune autre, surtout avec une grande aiguille de secondes. On y compte 1, 2, *un;* 1, 2, *deux;* 1, 2, *trois;* 1, 2, *quatre;* 1, 2, *cinq*, etc., et le reste, pour les dizaines, comme dans les cas ci-dessus.

Les aiguilles qui subdivisent les divisions du cadran en petits coups, comme en 4, dans les pièces à 14,400 vibrations par heure, ou dans les autres susindiquées, sont appelées *trotteuses;* ce mot ne doit pas être pris en mauvaise part, car les trotteuses sont préférées par la plupart des bons observateurs, parce qu'elles battent d'elles-mêmes les subdivisions de la seconde. Quelques-uns ne nomment pas les nombres avec la voix, ni même tout bas, mais les comptent sur le cadran à la vue aidée de la loupe; mais ce moyen, praticable avec l'habitude, comme tous les autres, est moins facile. La persévérance et l'habitude finissent par rendre ce petit *manége* si aisé, que, tout en comptant les coups de l'observation, on arrive à occuper son esprit de quelques idées communes, soit de précaution, soit autres, sans erreur d'un seul battement. M. de Lalande soutenait même, dit-on, une conversation ordinaire tout en continuant de tête ces petits calculs, sans y éprouver d'erreur; mais il est plus facile et plus sûr d'opérer seul et dans le silence du cabinet. Il arrive quelquefois que, de deux observateurs qui répètent immédiatement la même observation, l'un compte un 10e ou même un 5e en plus ou en moins; mais l'effet en est dû souvent à la différence d'organisation plus subtile ou plus vive chez l'un que chez l'autre. Si les points de départ ont été sentis de même, la durée du phénomène observé reste toujours égale. Mais nous devons laisser le surplus de ces remarques déjà trop longues à l'intelligence de l'artiste. *Avec les mouvements à 14,400 vibrations ou autres, on procède d'une manière analogue.*

On peut se faire à peu de frais un observatoire à la campagne, dans un jardin éloigné des grandes routes, avec peu d'instruments (1). On considère généralement la lunette méridienne comme le fond principal de presque toutes les observations astronomiques,

(1) Le méridien *solaire* n'y doit pas être confondu avec *celui magnétique* de la boussole, comme nous l'avons vu faire à des gens dont le charlatanisme déguisait l'ignorance!!!...

où il faut presque toujours avoir le passage de l'astre au méridien. Il faut y joindre un bon régulateur, un télescope d'un pouvoir amplifiant de 150 ou 200 fois au plus, et peut-être un *cercle entier* à double lunette pour les angles, ou un quart de cercle mobile qui est moins dispendieux. Le pouvoir amplifiant de la partie optique de ces instruments est bien moins important que la netteté et le tranché des bords de l'image. Il ne s'agit pas ici de la curiosité vulgaire de *voir des animaux dans la lune*, que l'on n'y distinguerait peut-être jamais, lors même que le défaut d'humidité présumé de sa partie visible leur permettrait d'y exister ; mais bien de préciser la vitesse de mouvement par les révolutions et le contact des bords de l'astre bien tranchés, avec des fils réticulaires bien distincts et placés juste au foyer de l'objectif, pour y éviter toute *parallaxe optique ;* on nomme ainsi un mouvement apparent et relatif entre l'astre et le fil réticulaire lorsque l'œil se déplace, et qui a lieu en ce cas quand le réticule n'est pas exactement au foyer de l'objectif, quoiqu'il soit à celui de l'oculaire, car ces deux foyers doivent coïncider absolument, autrement l'observation serait sujette à une erreur plus ou moins forte. On détermine le point de coïncidence sur des objets éloignés, tels que la lune, parce que le *foyer objectif* change suivant les distances. Mais il ne change pas sensiblement en cas de grands éloignements, tandis que la différence est très-sensible sur des objets rapprochés ; on fait alors osciller l'œil pour s'en assurer. C'est aussi une raison de choisir le *point de mire* sur lequel se raccorde la vérification de la lunette, à une distance suffisante d'au moins 4 ou 5 cents toises, pour que la parallaxe sur ce point ne soit guère plus sensible que sur la lune, et d'avoir attention de tenir l'œil d'autant plus immobile quand on observe sur le point de mire. (Voyez *Lalande*, *Traité d'astronomie*, art. 2599.)

CHAPITRE VIII.

OBSERVATIONS, RECHERCHES, MODIFICATIONS ET PRINCIPES DE CONSTRUCTION, RELATIFS A L'ÉCHAPPEMENT A ANCRE DE GRAHAM, TRAITÉS ANALYTIQUEMENT PAR M. WULLIAMY, HORLOGER DU ROI A LONDRES,

Suivis d'un MÉMOIRE *contenant les expériences faites à l'Observatoire de Paris sur la suspension à ressorts du pendule astronomique,*

PAR MM. LAUGIER ET WINNERL.

1658. Nous nous empressons, dans ces dernières feuilles de notre ouvrage, d'offrir à nos lecteurs le résumé des moyens de progrès les plus modernes qui nous soient parvenus, pour l'exacte mesure du temps. L'excellent échappement de Graham, adopté si longtemps par les artistes les plus habiles et les plus sages, tel, autant que possible, qu'il était sorti des mains de son auteur, attendait encore, comme nous l'avons dit précédemment, quelques améliorations réservées aux temps modernes, ainsi qu'on vient de le voir pratiqué dans l'excellente Horloge astronomique que nous venons de décrire; on verra dans l'article ci-après que ces améliorations ont aussi été cherchées ailleurs, comme il arrive souvent, par l'extrait ci-après d'écrits sur ce sujet insérés en divers temps dans le *Journal*

des sciences et arts de Londres. Nous en allons rapporter textuellement ce que leur auteur *M. Wulliamy*, a bien voulu nous en procurer sur notre demande.

Il résulte des recherches de *M. Wulliamy* que Graham n'a rien transmis sur ce sujet, ni dans les *Transactions philosophiques* de la Société royale de Londres, ni dans ses propres écrits, et que, faute de renseignements positifs et d'explications théoriques de l'inventeur, les divers auteurs qui en ont traité n'ont pu le faire que sommairement et inexactement, sur la vue et les mesures matérielles des pièces en nature que le célèbre artiste a laissées après lui. Mais, depuis cette époque, dans cet échappement dont la pensée est si simple et si heureuse, l'expérience a cru reconnaître que le frottement des dents d'échappement sur le repos de l'ancre y produit une cause légère, mais sensible, de variation, surtout lorsque le va-et-vient y est un peu trop distinct, d'où quelques artistes réduisaient déjà dans ces derniers temps les arcs de supplément au moins d'étendue possible. Car, dès que le centre de l'ancre était éloigné de la roue suivant les proportions prises sur les propres modèles de l'auteur, la longueur des bras, l'ouverture des palettes et l'étendue du frottement des repos, avec l'épaississement de l'huile, y paraissaient un obstacle à l'extrême régularité. Il est probable que Graham aurait trouvé lui-même plus tard la correction raisonnée que l'on y porte aujourd'hui, s'il avait pu méditer davantage ce sujet; mais on sait que son temps était absorbé par une foule de constructions diverses que l'on soumettait à son excellent jugement, telles entre autres que celles des instruments d'astronomie de l'époque, et qu'il a composé lui-même des secteurs de 15 à 18 pieds de rayon, dimension rare et d'une perfection difficile, qui ont été et sont encore fort estimés. M. Wulliamy publia à diverses époques des mémoires fort étendus sur l'échappement de Graham; il y résuma les opinions et méthodes des divers auteurs et y exposa sa propre construction particulière, fort différente de celles jusqu'alors en usage, dans le but utile d'obvier aux inconvénients qui restaient à cet échappement. Comme cette question intéresse au plus haut degré l'Horlogerie astronomique ou de précision, nous en rapporterons ici les points essentiels, en renvoyant à l'original anglais les amateurs de remarques judicieuses de détail, parfaitement fondées en principes mathématiques, qu'ils y trouveront réunies.

L'auteur actuel, M. Wulliamy, divise son sujet comme il suit : tracé de l'échappement, défauts de la pratique en usage, modifications proposées, remarques analytiques pour guider la pratique, avantages du remède proposé. Nous ne nous astreindrons pas à suivre l'ordre de ces développements : nous nous bornerons aux expositions principales; après tout ce qui a été déjà dit sur ce sujet, l'intelligence du lecteur et les figures suppléeront aisément au reste.

1639. « Le nombre des dents, dit l'auteur, et son diamètre pris à la pointe des dents étant déterminés, décrivez-en le cercle, et marquez-y autant de pointes de dents, *plus une*, que vous voulez en faire embrasser par les palettes; aux deux extrémités de cet arc, marquez l'*épaisseur* des palettes avec celle de sa *chute*, ensemble égal à la moitié de l'arc entre deux dents voisines; tirez les cordes de ces deux petits arcs, et les prolongez jusqu'à leur intersection I, au-dessus de la roue, point où se trouve le vrai centre de mou-

vement des palettes. Mais, parce qu'il serait difficile, sinon impossible, de tirer exactement ces deux lignes, sans de meilleurs guides que deux pointes de dents si rapprochées, on pourra les tirer parallèles aux deux tangentes qui peuvent plus aisément s'établir sur deux rayons partant du centre de la roue pour faire bissection sur le milieu de l'épaisseur des palettes. Donc, du seul centre exécutable de mouvement W ainsi trouvé, et qui, dans la pratique, se confond avec le point I, décrivez les arcs de repos. Ensuite il faut déterminer l'angle de levée qui se prend à volonté et se fait ainsi : tirez deux droites du centre d'action, l'une et l'autre du même côté des cordes prolongées et faisant avec elle des angles égaux; alors il ne restera plus qu'à tirer les plans d'impulsion par diagonales, des points supérieurs à ceux inférieurs d'intersection des arcs de repos avec les lignes qui forment les plans de levée. Ces règles sont applicables à l'échappement fig. 2, pl. L. La roue n'a ici que six dents et les palettes n'en embrassent que deux, c'est-à-dire l'espace entre trois dents; mais ces proportions exagérées ne sont ici que comme exemple de parties supposées momentanément très-grandes, pour une plus facile démonstration. La fig. 3, de proportion usuelle, est plus rapprochée des vraies mesures recommandées ci et praticables.

« Les parties de tout échappement ont entre elles des rapports particuliers : les mesures de quelques-unes dérivent, par exemple, de la roue d'échappement et peuvent se dire constantes ou fondamentales, parce qu'elles ne changent point tant qu'on emploie la même roue; les autres parties sont relatives, parce qu'elles se font loi l'une à l'autre, et qu'elles s'accroissent et diminuent ensemble. »

L'auteur en a dressé une table particulière où les mesures sont exprimées en multiples et décimales du *rayon* de la roue d'échappement *pris* comme unité, et calculées pour toutes les ouvertures de palettes depuis 2 dents jusqu'à 13 (la roue étant toujours supposée en contenir 30), et pour deux différents arcs de levée, c'est-à-dire de 1° et de 2°. Nous donnerons cette table plus loin, en y joignant aussi la formule analytique qui en est la base.

« Il n'y a qu'un seul point où l'on puisse sans erreur placer le centre de mouvement des palettes; car, étant trop haut ou trop loin de la roue, une dent ne mènera pas assez sa levée pour que l'autre dent opposée tombe sur son repos; alors celle-ci aura une forte chute sur la levée de ce côté au lieu de tomber sur le repos, et cette levée la fera reculer avec frottement arc-boutant. Si le centre de l'ancre est au contraire trop près de la roue, une dent aura mené sa levée si loin avant d'en échapper, que celle opposée tombera en arrière du repos et plus qu'il ne faut, d'où le frottement sera augmenté inutilement et avec désavantage. (Nous avons dit ci-dessus que le centre W est le seul exécutable, et que d'ailleurs il se confond avec celui I dans la réduction à des mesures praticables.)

« La chute est un mal inévitable dans tout échappement; mais plus le principe sera appliqué exactement et l'exécution soignée, moins il y aura besoin de chute, et par suite moins de perte de force motrice et moins d'usure. La chute peut se réduire ici à son *minimum*. Notre méthode est universelle pour tout diamètre de roue, tous nombres de dents et ouvertures de palettes. Les dents n'y ont besoin d'être *soutaillées* (dégagées) que le moins possible, ce qui les rend plus courtes et plus solides. A la vérité, plus l'ouver-

ture des palettes est grande, moins les dents ont besoin d'être dégagées; mais il ne faut pas que le nombre des dents soit trop grand, car le contraire est plus près du but qu'on se propose, et une distance modérée du centre d'un ancre embrassant 6, 7 ou 8 dents est préférable.

« En mécanique, la force d'impulsion reste constante autant que l'angle de levée; car l'épaisseur ou base des plans est constante, et la hauteur est en raison directe avec les rayons des arcs de repos; mais le cas est tout autre dans la considération comme frottement, qui augmente avec la pression et l'étendue des surfaces, et celles-ci s'accroissent avec leurs distances du centre de mouvement: raison de plus pour tenir les bras courts.

« Les plans d'impulsion deviennent *moins rapides et plus énergiques* à mesure que les bras sont plus courts; mais il faut observer que le danger de l'usure des trous et des pivots de l'axe, quand l'impulsion est trop près du centre de mouvement, y prescrit une limite pratique. La diminution de l'angle de levée produit le même effet; mais avec l'énergie de l'échappement on augmente sa délicatesse, ce qui nécessite une main-d'œuvre d'autant plus soignée.

« Pour considérer toute influence sur la perfection de cet échappement, j'ai démontré, page 8 du mémoire, que la dent glisse contre les deux palettes avec différentes vitesses et quantités de frottement; parce que la portion d'un plan contre laquelle agit la dent en élevant le pendule de sa position de repos au point où la dent s'échappe, est plus longue que la portion de l'autre. Je donnai aussi à entendre qu'en changeant les plans en proportion de cercle, il serait possible de remédier à cette irrégularité, si la difficulté d'exécution ne laissait craindre une erreur plus grande que celle à corriger.

« Dans la construction ordinaire avec des bras et palettes de la même pièce d'acier, il est à peine possible que les surfaces soient trempées assez dur et que la forme des pièces se conserve; le plus léger écart de la direction voulue détruirait la concentricité des repos, avec augmentation de frottement et sans aucun remède; d'autre part, le moyen ordinaire de fermer et d'ouvrir l'ancre est très-imparfait et inexact. Pour y obvier, j'ai imaginé de faire sur le tour le porte-palettes, et même celles-ci, avec plus de perfection qu'à la main, et comme il suit :

1640. « Ayant arrêté le dessin suivant les règles et la table données, on pratique au moyen du tour dans une plaque de laiton, fig. 5, une rainure du diamètre voulu, capable de contenir juste les palettes. On tourne un anneau d'acier remplissant juste cette rainure; de la plaque découpée à la suite, on obtient un porte-palettes comme en fig. 6, 7 et 8, où les morceaux *a*, *b* des palettes sont retenus avec pression par de petites plaques vissées comme en fig. 5; mais pour dispenser d'ôter l'échappement plusieurs fois (en voulant établir la juste ouverture des palettes), je fais le porte-palettes de deux parties mobiles et concentriques, munies chacune par le haut d'un bras traversé par une vis micrométique, ayant à ses extrémités deux pas de progression peu différente, laquelle, sans rien démonter, modifie au besoin l'ouverture ou distance des palettes avec la plus grande précision. Les trous où pénètre cette vis sont pratiqués dans deux bouchons pouvant tourner sur eux-mêmes et obéir à la direction voulue de la vis, après quoi on peut

arrêter définitivement les deux porte-palettes au moyen de deux vis de pression placées près du centre, comme le tout est vu dans la fig. 3 de face, et dans son profil, fig. 4, dont tout artiste exercé concevra aisément les détails nécessaires. (*Pour finir les palettes, d'autres observations seront jointes à la table.*)

« Les avantages de cette construction sont donc évidemment que les repos restent absolument des parties de cercle parfaitement concentriques à leur axe ; que les deux palettes sont de même épaisseur et peuvent être trempées parfaitement dur ; que les plans d'impulsion peuvent former exactement les angles voulus ; que si l'une des palettes se trouve défectueuse, elle peut être aisément remplacée par un autre morceau identique du même anneau d'acier.

« Quant aux deux points I et W du centre de l'ancre, fig. 2 et 3, on observera que I serait l'intersection des tangentes communes des deux pointes de dents G D et H Y trop rapprochées dans l'exécution ; mais qu'en employant l'intersection W des tangentes intermédiaires plus faciles des rayons XV et XV' tirés au milieu de l'épaisseur des palettes, le point W, qui du reste se confond dans l'exécution avec I, doit être considéré comme le vrai centre exécutable de l'ancre, ainsi qu'il a été dit.

« L'échappement à cylindre des Montres, par *Graham*, ne diffère de son ancre pour le pendule qu'en ce que les levées du premier sont portées par les dents de la roue et que l'ouverture du cylindre n'embrasse que la largeur d'une dent ; l'action y est seulement un peu modifiée, ce qui ne change rien à la nature et aux principes du cylindre, qui sont au fond les mêmes que ceux de l'ancre. Par *B. L. Wulliamy*, *Londres*, 21 *juin* 1847. »

1641. NOTA. Une bonne partie de notre ouvrage est une suite presque rudimentaire de la première instruction pratique supposée acquise dans le moindre apprentissage, qui d'ailleurs peut toujours être amenée à sa perfection relative par la méditation de nos articles, où l'on trouve ainsi les moyens plus ou moins directs qui, quoique mêlés d'exemples médiocres, conduisent à faire de bonne Horlogerie pour l'usage civil.

Mais nous avons réservé pour la fin de ce volume et reporté vers ses derniers chapitres, ce que la haute Horlogerie marine et astronomique exige de recherches et de combinaisons ultérieures et particulières à l'espèce. Nous nous empresserons donc encore d'y insérer des expériences assez récentes sur la suspension à ressorts du pendule dans le but d'obtenir l'isochronisme de ses oscillations, comme Pierre Le Roy découvrit si heureusement dans son temps l'isochronisme des vibrations du balancier, par la longueur et la progression de force tâtées du ressort spiral, propriété que F. Berthoud développa ensuite par un léger calcul.

Nous avons cru devoir rapporter textuellement le mémoire ci-après, communiqué à l'Académie des Sciences, concernant une des expériences les plus importantes de notre époque pour l'exactitude de la mesure du temps ; nous avions déjà indiqué celles-ci dans plusieurs passages précédents, comme faites à l'Observatoire de Paris, sollicitées par *M. Winnerl*, adoptées et exécutées conjointement et calculées par *M. Laugier*, membre du bureau des Longitudes et de l'Académie, et communiquées par ce savant à cette société, ce qui leur imprime un caractère authentique et d'autant plus assuré de confiance

Nous comptions abréger beaucoup le contenu de ce mémoire; mais l'importance des résultats et les développements lucides et précis de ces deux auteurs nous déterminent à le reproduire en entier; tous les articles en sont si substantiels et si pleins, qu'il serait impossible d'en faire une analyse abrégée, sans faire perdre des observations de détail, toutes intéressant le fond du sujet, traité d'ailleurs aussi clairement et succinctement que parfaitement senti (1).

MÉMOIRE

CONCERNANT L'INFLUENCE DU RESSORT DE SUSPENSION

Sur la durée des oscillations du pendule,

Par M. Laugier, *membre du Bureau des Longitudes de Paris et de l'Académie des Sciences, et* M. Winnerl, *professeur de haute Horlogerie marine et astronomique,*

Communiqué à l'Académie dans sa séance du 14 juillet 1845.

1642. « Les irrégularités dans la marche des pendules exercent une trop grande influence sur les résultats déduits des observations faites aux instruments méridiens, pour qu'on doive s'étonner que divers astronomes, que M. Bessel entre autres, en aient fait l'objet de leurs méditations. Dans son dernier voyage à Paris, l'illustre directeur de l'Observatoire de Kœnigsberg recommanda au célèbre constructeur de chronomètres, M. Win-

(1) Si nous nous sommes permis dans la transmission de ce mémoire certaines intercalations entre parenthèses et autres notes, c'est uniquement en faveur de quelques-uns de nos lecteurs moins avancés dans cette matière; car nous ne pourrions rien ajouter ici aux faits et aux idées qui, pour les savants, n'ont aucun besoin de nos explications et se suffisent parfaitement à eux-mêmes.

Si nous répétons, par exemple, dans cette note, que la suspension à ressort de *Clément*, Horloger anglais, vers 1680, ayant été longtemps imitée avec un seul ressort, celui-ci était trop faible et trop long pour contribuer aucunement à l'isochronisme auquel Clément ne pensait pas, c'est pour dire qu'il résultait en outre de sa méthode une torsion accidentelle du plan de la lentille, exigeant ce qu'on nomme une *passe* méplate engagée dans l'ouverture de la fourchette, et accompagnée en ce point d'une gêne irrégulière avec frottement défectueux. On a mieux observé depuis combien la moindre déviation du plan de la lentille, à l'égard de celui des oscillations, influe sur la durée de celles-ci. C'est dans ce but qu'on a substitué souvent à la forme lenticulaire, celle cylindrique ou tout à fait sphérique, mais éprouvant un peu plus de résistance de l'air. Ce ne fut que vers l'époque où F. Berthoud renonça définitivement à la suspension à couteau pour employer celle à ressorts, qu'il y fit usage de deux lames élastiques où les extrémités de l'axe d'oscillation étaient assez éloignées entre elles pour maintenir exactement le plan de la lentille. C'est pourquoi, dans nos articles précédents, nous avons toujours orthographié le mot *ressorts* au pluriel, afin de prévenir l'erreur trop commune de ceux qui croient encore qu'il suffit d'une seule lame de ressort. Si dans le mémoire ci-joint le mot *ressort* est employé au singulier, c'est que, pour abréger, ses auteurs n'ont voulu exprimer qu'une seule extrémité de l'axe d'oscillation, fonctionnant comme pivot de ce côté, et dans la supposition évidente qu'un pareil ressort à l'autre extrémité de l'axe représente l'autre pivot, ce qui établit toujours les deux lames de ressort voulues et assez éloignées entre elles pour une bonne suspension.

Dans une pièce ancienne du célèbre *Graham*, nous avons trouvé l'axe de suspension portant l'ancre, formé d'une forte barrette ou branche d'acier méplate posée de champ; elle est terminée sur le devant par un assez fort pivot roulant, ou plutôt oscillant dans un trou un peu grand de la grande platine; l'autre extrémité du fond est formée en couteau, de même pièce; celui-ci oscille sur un pla-

nerl, de rechercher avec soin les conditions pratiques de l'isochronisme du pendule (1). M. Bessel croyait qu'un pareil travail exigerait, par sa délicatesse, l'emploi de tous les moyens de précision dont on dispose seulement dans les grands observatoires. D'après la désignation de M. de Humboldt, l'habile artiste réclama mon concours. Le sujet intéressait trop l'astronomie pour que je pusse hésiter. Telle est l'origine du mémoire que j'ai l'honneur de présenter à l'Académie. Nous avons fait en commun, M. Winnerl et moi, toutes les expériences qui y sont discutées. Je me plais à déclarer qu'il m'eût été difficile de trouver un collaborateur plus habile et plus scrupuleux.

« L'Horloge astronomique semble avoir atteint, de nos jours, le dernier degré de perfection ; les artistes consciencieux avoueront cependant qu'ils ne sont pas toujours certains de réussir dans l'exécution de ces machines délicates, et qu'après avoir pris les précautions les plus minutieuses, ils arrivent parfois à des résultats qui laissent encore beaucoup à désirer : au contraire, il n'est pas rare de rencontrer des Pendules médiocrement exécutées qui offrent (*momentanément*) dans leur marche une précision tout à fait extraordinaire. Ces singulières anomalies sont attribuées à des compensations qui se produisent *accidentellement* entre le régulateur, le rouage et le moteur, dans des circonstances qui n'ont pas été suffisamment étudiées.

« Parmi les pièces qui composent une Horloge, une des plus importantes est celle qui sert à suspendre le pendule ; elle a sur son mouvement une influence immédiate. Aussi, depuis l'époque où Huyghens appliqua le pendule aux Horloges, le mode de suspension a-t-il été un sujet d'études pour les astronomes et les artistes. Dès ses premiers essais, Huyghens s'était aperçu que les oscillations du pendule n'étaient pas isochrones, de sorte qu'une diminution dans la force motrice, en rendant l'amplitude plus petite, faisait avancer l'Horloge. Pour obvier à cet inconvénient, il imagina de suspendre le pendule à l'aide d'un fil qui, dans le mouvement, s'appliquait alternativement sur deux lames courbées en cycloïdes. Il avait reconnu que le centre de gravité d'un tel pendule devait décrire un arc de cycloïde, et que, par conséquent, la durée de ses oscillations était indépendante de l'amplitude. Ce mode de suspension, digne du génie de Huyghens, offre dans la pratique des difficultés qui, malheureusement, n'ont pas été surmontées. Le pendule cycloïdal a donc

teau d'acier bien plan et très-horizontal porté par un pont, où le poids de la lentille, qui est en mercure, maintient l'angle du couteau sans déplacement sensible, quoiqu'il n'y ait point de gouttière. Le pendule est suspendu directement par un enfourchement chevillé à la barrette d'acier, tout près du couteau, et sa tige descend entre le pont et la platine. Nous possédons un compteur d'*Ellicott*, où l'échappement à ancre est établi en partie suivant cette méthode.

Cet emploi du couteau de *Graham* indique qu'il ne pensait pas alors à obtenir l'isochronisme par la suspension ; mais il est évident que, dans ce but, celle à ressorts devient indispensable, outre qu'elle est préférable sous d'autres rapports, comme nous l'avons dit ailleurs (1622).

(1) Nous ne saurions trop regretter ici la perte de M. *Bessel*, qui savait apprécier et aider la pratique ; car c'est lui et le savant M. *Laugier* qui ont eu le courage de procurer à l'étude l'exemple, trop rare dans ces derniers temps, de réunir la théorie et la pratique, deux parties qui ont le plus grand besoin de s'entr'aider. Espérons que ces exemples utiles encourageront les savants à descendre des *hauteurs* de l'analyse à l'observation des moyens *modestes d'application* qui, appuyés sur l'expérience, indiquent encore plus sûrement les résultats de l'emploi de la matière, et peuvent d'ailleurs *faciliter l'usage* des instruments, *comme aussi contribuer à leur conservation*.

été abandonné. On imagina ensuite les suspensions à ressort et à couteau (*celle à ressort est presque la seule actuellement en usage*).

« Nous nous proposons dans ce mémoire d'étudier la suspension à ressort, et d'indiquer le parti qu'on en peut tirer pour produire l'isochronisme des oscillations du pendule dans des limites qui dépassent de beaucoup les besoins de la pratique. L'idée de faire concourir le ressort de suspension à l'isochronisme des oscillations du pendule n'est pas nouvelle : elle se trouve exposée avec quelques détails dans l'*Histoire de la mesure du temps* par Ferdinand Berthoud ; mais on n'a pas fait jusqu'ici d'expériences concluantes pour en démontrer l'efficacité. Ferdinand Berthoud lui-même ne paraît pas avoir attaché une grande importance à cette idée, car il employait habituellement la suspension à couteau, et, dans son *Essai sur l'Horlogerie*, il rejette la suspension à ressort comme défectueuse et comme laissant au mouvement du pendule moins de liberté que la suspension à couteau (1)

« M. F. (artiste étranger), justement renommé pour l'excellence de ses Chronomètres, est le seul qui se soit occupé de ce sujet sous le point de vue de la pratique ; il a consigné le résultat de ses recherches dans un mémoire lu à la Société royale en 1838 ; mais, dans ses expériences, il n'a jamais séparé le pendule du rouage, ce qui empêche de distinguer l'effet produit par le ressort de l'influence variable du poids moteur sur l'échappement. L'isochronisme qu'il a pu réaliser résultait d'un équilibre favorable établi momentanément entre la force du ressort et le frottement de la roue d'échappement sur les repos de l'ancre, de sorte qu'il ne pouvait être, pour ainsi dire, qu'accidentel et de courte durée.

« Ces objections ont été présentées par M. Bessel dans le numéro 465 du *Journal astronomique* de M. Schumacher, et il s'en sert pour expliquer comment il se fait que les artistes qui ont voulu répéter les expériences de M. F. ne sont pas arrivés aux mêmes résultats que lui. M. Bessel ajoute : « Quoique le pendule de M. F. ne soit pas réellement
« isochrone, cela ne prouve rien contre la possibilité de donner cette propriété au pen-
« dule ; au contraire, cette possibilité ressort évidemment du mouvement du pendule
« cycloïdal dont les oscillations grandes ou petites s'accomplissent en temps égaux. Il n'y
« a donc d'autres dispositions à chercher pour produire l'isochronisme que celles qui le
« produiraient sûrement dans toutes les circonstances sans faire naître aucun inconvé-
« nient. Ce problème est, à mon avis, le plus important que puissent résoudre ceux qui
« cherchent à donner aux Horloges le dernier degré de perfection. »

« Nous rapportons ici ce passage du mémoire de M. Bessel, parce qu'il indique dans quel sens doivent être dirigées les expériences, et qu'il explique, en outre, l'insuccès de ceux qui ont cherché l'isochronisme en dehors du mouvement même du pendule, et qui l'ont obtenu soit par la pression de la roue d'échappement sur les repos de l'ancre, soit par les courbures plus ou moins grandes données aux surfaces de ces repos.

« Ce genre d'isochronisme n'était que momentané ; il devait nécessairement éprouver

(1) *Berthoud a fini par employer des ressorts, mais trop longs, dans toutes ses dernières suspensions.*

des variations analogues à celles qui se produisent dans le frottement; mais si le mouvement du pendule était isochrone *dans son essence*, l'action du rouage (*le plus parfait*) pourrait ne pas modifier sensiblement cette propriété.

« Guillaume Clément, Horloger de Londres, auteur de plusieurs perfectionnements importants, paraît avoir employé le premier la suspension à ressort : il rechercha toujours les ressorts les plus flexibles, afin de laisser au mouvement du pendule le plus de liberté possible. Cette flexibilité est encore aujourd'hui recommandée par les Horlogers, et, pour l'obtenir, ils donnent au ressort de suspension une assez grande longueur; son action est cependant d'autant plus sensible que sa longueur est plus petite, et cette seule considération aurait dû faire sortir de la voie ordinaire ceux qui préconisaient la suspension à ressort, à cause de l'influence même de ce mode de suspension sur le mouvement du pendule. Si l'on réfléchit à la manière dont s'exécute le mouvement du pendule, on voit que deux effets distincts concourent à son isochronisme : le premier tient à la flexion du ressort qui, à chaque instant, diminue d'autant plus la longueur du pendule, qu'il s'écarte davantage de la verticale; le second, qui paraît être le plus considérable, est causé par la résistance du ressort; il ajoute à l'intensité de la pesanteur un terme variable avec l'amplitude et augmentant sans cesse avec elle. Ce terme diminue toujours la durée des oscillations et a d'autant plus d'influence, que l'amplitude est plus considérable; on conçoit, d'après cela, qu'en choisissant convenablement le ressort de suspension, ce double effet, dû à sa flexion et à sa résistance, puisse en chaque point de l'arc décrit par le centre de gravité du pendule, être égal à la différence qui ordinairement se manifeste entre les durées des oscillations suivant l'amplitude : en d'autres termes, on conçoit que ce double effet puisse varier de manière à rendre le pendule isochrone. Si la force du ressort est très-faible relativement au poids de la lentille, les oscillations auront une durée moindre dans les petits arcs que dans les grands, comme il arrive ordinairement; mais si l'on augmente la force du ressort, il peut se faire que la durée des oscillations diminue lorsque l'amplitude augmente dans de certaines limites, de sorte que l'on aura, pour ainsi dire, dépassé l'isochronisme.

« Nos expériences ont confirmé la justesse de ces considérations, car elles ont réalisé les différents cas qui viennent d'être énumérés : on peut s'en convaincre en jetant un coup d'œil sur le tableau où nous avons réuni tous les résultats de nos observations. Nous allons maintenant donner quelques détails sur l'appareil que nous avons employé et sur la méthode que nous avons suivie.

« Le pendule qui a servi pendant toute la durée des expériences est formé d'une règle de sapin de 1 mètre de longueur, de 5 centimètres de largeur et de 6 millimetres d'épaisseur. Une des extrémités de la règle, portant une pièce de cuivre taraudée, peut être fixée par une vis au centre même de la lentille; l'autre extrémité, également garnie de cuivre, peut s'accrocher à la pièce de suspension. On sait que le sapin éprouve de si légers changements de longueur par des variations de température assez considérables, qu'il a été proposé pour remplacer les grils métalliques destinés à produire la compensation; nous avons eu soin d'ailleurs d'opérer à des températures peu différentes, et des

thermomètres placés dans la cage destinée à préserver le pendule des courants d'air n'ont varié qu'entre 18 et 23 degrés centigrades (c'est-à-dire de 4 degrés centigrades) pendant toute la durée de nos expériences. Ainsi l'on peut considérer notre pendule comme ayant été indifférent aux variations de température.

« L'appareil de suspension consiste en deux lames élastiques d'acier trempé, dont chaque extrémité, traversée par de petites goupilles, est pincée fortement entre deux plaques de cuivre vissées l'une contre l'autre : les deux plaques de l'extrémité inférieure du ressort portent un axe auquel le pendule peut être accroché, et celles de l'extrémité supérieure font corps avec un chevalet en cuivre, épais de 17 millimètres et dont le diamètre a 22 centimètres de longueur. Ce chevalet a été fixé au mur avec une extrême solidité, à l'aide d'un fort crochet en fer qu'on y avait profondément scellé, et de trois vis situéesà 120 degrés de distance, qui, prenant leurs points d'appui sur le mur lui-même, maintenaient le chevalet contre la tête du crochet. Nous insistons sur ces détails pour qu'on ait une entière sécurité relativement à la fixité de la suspension, d'où dépend en grande partie l'exactitude des résultats.

« L'action du ressort de suspension est liée directement au poids de la lentille oscillante; aussi, afin d'étudier cette action, nous avons fait usage de quatre lentilles en cuivre, des poids de 2, 4, 6 et 8 kilogrammes, et de deux ressorts pris dans le même morceau d'acier trempé; comme nous venons de le dire, chaque *essai* de suspension se compose de deux lames élastiques. Celles qui constituent le premier *essai* ont 24/100es de millimètre d'épaisseur, 5 millimètres de largeur et 1 millimètre de longueur; ce ressort a été successivement combiné avec les quatre lentilles. Les deux lames qui forment le second *essai* ont même épaisseur et même largeur que les premières; leur longueur est de 3 millimètres; ce second ressort a été combiné avec les lentilles de 4, 6 et 8 kilogrammes. Nous avons eu ainsi sept pendules que l'on a fait osciller chacun un grand nombre de fois dans les amplitudes de 1, de 3 et de 5 degrés.

« Pour observer la durée des oscillations du pendule dans une amplitude déterminée, dans l'amplitude de 5 degrés par exemple, on commençait l'expérience lorsque l'amplitude était de 7 degrés, et on la terminait lorsqu'elle était de 3 degrés; de sorte que le pendule pouvait être considéré comme ayant oscillé dans l'amplitude *moyenne* de 5 degrés. Nous nous sommes assurés, en scindant la série en plusieurs parties, que la petite erreur que l'on commettait en opérant ainsi, inférieure de beaucoup aux erreurs des observations, était tout à fait négligeable. Les amplitudes extrêmes que l'on a choisies étaient 4 et 2 degrés pour l'amplitude moyenne de 3 degrés, et de 1 1/2 et 1/2 degré pour l'amplitude moyenne de 1 degré.

1643. « La méthode que nous avons suivie pour déterminer exactement la durée du nombre d'oscillations que faisait le pendule libre dans une certaine amplitude, consiste à le comparer un grand nombre de fois, au commencement et à la fin de chaque série, avec une Horloge dont la marche était déterminée par des observations astronomiques. Un compteur réglé sur le pendule en expérience et placé à côté de lui, indiquait à chaque instant le nombre de ses oscillations. On peut se convaincre, d'après l'accord qui

existe entre les différentes observations, de l'exactitude du résultat définitif. Le nombre des oscillations dans chaque expérience ne dépassant guère 2,000, nous avons choisi la durée de 2,000 oscillations pour terme de comparaison : de cette manière, les erreurs d'observation ont conservé leur véritable grandeur dans les résultats que nous publions, et la comparaison peut en être faite immédiatement.

« Ce sont les nombres exprimant la durée de 2,000 oscillations qui figurent dans le tableau que nous avons dressé. On y verra que, pour les quatre premiers pendules, la durée des oscillations est moindre dans les grandes amplitudes que dans les petites, et que la différence est d'autant moindre que le poids de la lentille est plus considérable. On aurait sans doute obtenu l'isochronisme si l'on eût opéré avec des lentilles de plus en plus lourdes.

« Les pendules n°s VI et VII, au contraire, exécutent des oscillations d'autant plus lentes que l'amplitude est plus grande, de sorte que les ressorts qui, combinés avec les lentilles de ces deux pendules, produiraient l'isochronisme, devraient, si l'expression nous est permise, avoir des propriétés intermédiaires entre celles des deux ressorts dont nous nous sommes servis. On remarquera enfin que le pendule n° V offre l'exemple d'un isochronisme presque rigoureux dans les amplitudes comprises entre 1 et 5 degrés. Quoique ce résultat n'ait été obtenu que pour un nombre d'oscillations peu différent de 2,000, il n'est pas douteux qu'on ne puisse l'étendre à un nombre quelconque d'oscillations, puisque, d'après nos observations, on peut, à volonté, se tenir en deçà de l'isochronisme, ou le dépasser de beaucoup.

« Il résulte donc de ces expériences que, le poids de la lentille fixé à une règle de sapin étant donné, on peut trouver un ressort de suspension qui rende le pendule isochrone.

« Il sera certainement très-intéressant de connaître la loi mathématique qui lie la force du ressort au poids de la lentille ; mais, peut-être, ne dispensera-t-elle pas d'avoir recours à l'expérience pour déterminer le poids de la lentille qui, avec un ressort donné, rendra un pendule isochrone. En effet, la constitution moléculaire de ce ressort, et le degré de trempe qu'il a reçu, sont des éléments fort importants qu'il est bien difficile d'apprécier numériquement. Pour faire ressortir leur influence, nous prîmes un ressort dont les dimensions étaient exactement les mêmes que celles du deuxième ressort, et nous le substituâmes à celui-ci dans la cinquième expérience pour laquelle l'isochronisme existe à très-peu près : cette observation fut décisive. Avec ce ressort de mêmes dimensions, mais qui avait été tiré d'un autre morceau d'acier, la différence entre les durées de 2,000 oscillations dans les amplitudes de 1 et de 5 degrés, s'éleva à trois dixièmes de seconde (*en* 3′ 20″).

« Quoi qu'il en soit, les artistes préféreront peut-être procéder expérimentalement. Si l'on dirige bien les essais, on peut en quelques jours rendre un pendule isochrone. Comme il est indispensable que la position du ressort soit tout à fait invariable, il vaut mieux faire porter les tâtonnements sur le poids de la lentille, en conservant toujours le même ressort de suspension. Pour faire l'expérience plus commodément, on pourra se

servir d'une lentille composée de plusieurs disques parallèles (et verticaux) que l'on remplacera à volonté par d'autres plus ou moins lourds. Il est à peine nécessaire d'ajouter que le pendule en expérience devra être à compensation, afin qu'on n'ait rien à craindre des changements de température. Bien que la résistance de l'air ne soit pas constante, comme ses variations sont peu considérables, l'influence qu'elle exerce sur le mouvement du pendule est à peu près négligeable ; on pourrait cependant en tenir compte en employant le moyen qu'indique M. Bessel dans le mémoire déjà cité.

« Le pendule une fois rendu isochrone, il est important, lorsqu'il sera réuni au rouage, que l'échappement lui transmette la force du moteur sans nuire à la liberté de son mouvement, et surtout sans changer la nature de ses oscillations, sans quoi on perdrait le bénéfice de l'isochronisme.

« Il n'y faut donc pas employer l'échappement à ancre actuellement en usage dans les Horloges astronomiques; car, comme il est constamment en contact avec le pendule, il est impossible qu'il ne gêne pas son mouvement; de plus, pour diminuer les frottements de la roue sur les repos, on est obligé d'employer l'huile, qui est une cause incessante de variations.

« L'échappement à vibrations libres, comme son nom l'indique, semble devoir remplir les conditions exigées : il n'est en communication avec le pendule que pendant la très-courte durée de l'impulsion, il a en outre l'avantage de fonctionner sans huile.

« Au surplus, en supposant que cet échappement altérât sensiblement l'isochronisme, on pourrait déterminer son influence expérimentalement, et ensuite, au lieu de rechercher l'isochronisme pour le pendule libre, on ferait en sorte que la durée de ses oscillations dans les diverses amplitudes s'éloignât de l'égalité d'une quantité égale à celles que produirait l'échappement, mais de signe contraire; de cette manière, le pendule qui, libre, ne serait pas isochrone, acquerrait cette propriété dès qu'il oscillerait en communication avec l'échappement.

« Ces essais préliminaires ne sembleront pas difficiles aux constructeurs de Chronomètres, car ils procèdent d'une manière analogue lorsqu'ils cherchent à rendre isochrones les oscillations du balancier à l'aide du ressort spiral, et l'on sait à quel degré de précision ils sont arrivés sous ce rapport; ils ne regretteront certainement pas le temps qu'ils auront employé à suivre la méthode que nous venons d'exposer, si l'isochronisme qu'ils obtiendront doit avoir, pour le perfectionnement des Horloges astronomiques, la même importance que la découverte de Pierre Leroy pour celui des Montres marines. »

1644. On trouvera à la fin de ce volume, parmi plusieurs autres tables, celle de ce mémoire, dont les principes paraîtront, aux artistes instruits, promettre un acheminement réel vers l'exactitude de la mesure du temps. L'échappement à ancre, avec ses leviers réduits, approche déjà plus que bien d'autres de cette exactitude par l'équilibre établi, comme on l'a vu (1615), entre le léger retard de ses repos, et l'accélération naturelle de ses levées. Il reste donc à expérimenter si l'échappement libre en pendule, modifié comme nous l'avons indiqué paragraphe 1514, et laissant parfaitement indépendante la très-majeure partie de deux oscillations, obtiendra plus d'avantage; il est vrai que la longueur

du pendule de 3 pieds, etc., ne donnant à l'aiguille qu'un mouvement de deux en deux secondes, ne produirait la subdivision de chacune en cinquième qu'au moyen du Chronomètre de poche tenu à l'oreille, comme nous l'avons déjà recommandé. Enfin l'expérience fera connaître si le dégagement de la détente de cet échappement libre offrira une résistance moindre et plus constante que les repos de l'ancre tenus simplement gras, mais sujets encore à l'épaississement progressif de ce corps gras, etc.; c'est ce que nous laissons à résoudre aux artistes qui pourront se livrer à ces épreuves. Dans tous les cas, l'un ou l'autre moyen paraît devoir produire un perfectionnement très-sensible.

1645. On trouverait aussi de l'avantage, suivant notre avis, à réduire, comme nous l'avons déjà dit ailleurs, les dimensions du rouage et de la cage, qui constituent ce qu'on appelle le *mouvement*, dont le calibre pourrait ne se composer que d'une première roue de cylindre pour le poids, et immédiatement d'une 2ᵉ roue, celle des minutes; puis d'une autre intermédiaire entre celle-ci et la roue de secondes (avec l'échappement à ancre), ou même de la cinquième petite roue nécessitée par l'échappement libre (considération qu'il conviendra de faire entrer dans la comparaison des expériences proposées ci-dessus). La disposition de ces mobiles nous paraîtrait aussi fort convenable, si la 1ʳᵉ roue du poids avait ses pivots sur la même ligne horizontale que la roue de minutes, en sorte que la force motrice fût appliquée entre ces deux mobiles du côté de leur engrenage, ce qui réduit sensiblement, comme on sait, les frottements des pivots du premier mobile, suivant l'excellente observation de *Julien Leroy*. Le canon de l'aiguille des heures étant porté par la tige de la roue de cylindre, et celle des minutes par la chaussée de la roue de minutes, auraient chacune leurs divisions de cadran à part, sur des cercles d'autant plus réduits : ceux d'heures et de minutes seraient à la même hauteur horizontale, celui des secondes se trouverait au-dessus et au milieu; ces trois cadrans forment un triangle; les aiguilles ne passeraient pas les unes au-dessus des autres; cette disposition très-commode n'est pas nouvelle. Nous convenons que les cadrans particuliers n'auraient que de petites aiguilles, vu la réduction générale du calibre, mais nous supposons toujours ici l'usage du chronomètre de poche à l'oreille dans toute observation, et cette distribution supprimerait les grandes aiguilles de secondes considérées, ainsi que la chute, par plusieurs artistes, comme des défauts de surcharge pour l'échappement. Il serait superflu d'observer ici que la réduction d'un calibre de cette espèce produirait moins de descente du poids et faciliterait une marche d'un mois et plusieurs jours, tout en laissant les cadrans à la hauteur de l'œil. Ce sera à ceux qui approuveront cette disposition ébauchée ici à la pourvoir des autres améliorations connues.

1646. Nota. Le raccourcissement des bras de l'ancre de Graham n'a pas été seulement adopté chez les deux nations que nous avons indiquées, il l'a été aussi en France, et nous l'avons vu pratiqué à Paris il y a quelques années par M. *Howie*, habile artiste, qui, peu de temps après, alla s'établir à Amsterdam. M. Henry Robert, secrétaire général de la Société chronométrique de Paris, y développa aussi ce système, et nos derniers articles sur ce sujet nous ont valu une note de sa part que nous devons communiquer à nos lecteurs. Nous avons rapporté plus d'une fois dans cet ouvrage des productions modernes

plus ou moins médiocres pour l'usage civil et qui nous ont été transmises par leurs auteurs, mais nous les avons introduites comme encouragement à l'amélioration raisonnée; à plus forte raison devons-nous accueillir celles qui appartiennent à la haute Horlogerie. Voici donc la communication que nous avons reçue sur ce sujet :

« Monsieur, me permettrez-vous de vous transmettre quelques mots relatifs à l'in« fluence de la longueur des bras de levier des échappements à repos sur la marche des « Pendules, et notamment de celles à ressort moteur, dites à demi-secondes ?

« Lorsque l'on voit dans les pendules des longueurs de leviers d'échappement si diffé« rentes, on serait tenté de croire mal à propos que cette longueur importe peu, et qu'elle « est entièrement arbitraire. L'examen de cette question doit apporter de l'intérêt sur « quelques considérations pratiques concernant cette matière que je ne ferai qu'effleurer « dans cette lettre.

« Dans l'échappement à repos en pendule, deux points sont à considérer, la *levée* et « le *repos*. Sous le rapport de la *levée*, un habile artiste a démontré que, *géométrique« ment* (1), peu importe la longueur des leviers, dont le résultat est le même, sauf les « frottements qui augmentent un peu sur les levées avec la longueur de leurs plans in« clinés. J'admettrai ici cette théorie, voulant seulement appeler l'attention sur l'effet « des repos. J'essayerai de montrer que dans les Pendules d'appartement à demi-secondes « du commerce, l'échappement, par ses mauvaises proportions, est une des principales « causes de leur infériorité, si on les compare, soit aux Pendules à secondes, soit aux « bonnes Pendules ordinaires toutes simples, et cela parce que *plus les leviers d'échap« ment sont longs, par rapport à la longueur du pendule, plus les différences de la « force motrice ont une influence marquée sur la durée des oscillations, en raison de la « pression de la roue d'échappement sur les repos*. En effet, cette pression agit comme « force retardatrice sur le pendule considéré, pendant le repos, comme un levier dont le « point d'appui se trouve au centre de suspension, la force motrice étant dans la lentille « au centre d'oscillation, et la résistance au point de repos (2). J'en conclurai qu'il faut « prendre en considération la longueur du pendule pour déterminer la longueur des « leviers d'échappement et les raccourcir autant qu'une exécution judicieuse et ration« nelle le permet.

« En 1834, voulant être fixé sur l'importance de ces proportions dans la pratique par « des expériences décisives, je construisis avec soin une Pendule à laquelle quatre échap« pements différents pouvaient s'adapter alternativement, toutes choses restant d'ailleurs

(1) Je dis *géométriquement*, parce que plus tard l'expérience viendra peut-être modifier les conséquences qu'on peut tirer de cette démonstration géométrique, comme cela est arrivé tant de fois. Je me crois d'autant plus fondé à faire cette réserve en faveur de l'expérience, que cet artiste dit lui-même : *Les considérations théoriques, quelque spécieuses qu'elles soient, ont toujours besoin d'être appuyées des résultats de la pratique.*

(2) Pendant le temps de la levée, au contraire, les choses se passent autrement : l'action de la roue sur le levier est alors la force motrice qui entretient ou répare la puissance du pendule, et la len« est la résistance.

« les mêmes, et dans des conditions identiques. Je ne rendrai compte ici que des résul-
« tats obtenus en employant alternativement deux forces motrices qui étaient entre elles
« comme 2 : 3.

« On verra dans le tableau ci-contre (*voyez* la table à la fin du 2e volume) que j'ai
« comparé les résultats de deux échappements à repos : dans l'un, les bras du levier
« étaient de onze millimètres, et dans l'autre échappement, d'une forme nouvelle et
« composée exprès, les bras étaient seulement de cinq millimètres et demi. Les change-
« ments dans la marche de la Pendule, résultant d'une différence dans l'intensité de la
« force motrice, ont été à peu près en raison directe de ces longueurs de bras ; d'où l'on
« doit conclure qu'il convient de réduire la longueur des bras de leviers comme je l'ai
« dit plus haut.

« La pression sur les repos est une force retardatrice si grande et qui contribue telle-
« ment à déterminer la durée des oscillations, que, dans le cours de mes expériences (la
« suspension, le pendule et toutes les autres parties de la machine étant restées absolu-
« ment les mêmes), l'échappement dont les leviers étaient de 11 millimètres retarda de
« 6 minutes et demie en 24 heures sur celui dont les bras n'avaient que 5 millimètres
« et demi. Ce retard eût été de 30 minutes au moins avec des leviers de 60 millimètres,
« tels qu'on les emploie dans les demi-secondes ordinaires du commerce.

« On jugera d'après cela combien est grand le vice introduit dans ces Pendules lors-
« qu'elles comportent des leviers d'échappement aussi longs, et l'on ne s'étonnera pas de
« voir de simples Pendules ordinaires, avec de petites ancres dites *à demi-repos*, avec des
« lentilles beaucoup moins pesantes et une simple suspension à soie, le tout étant dans
« de bonnes conditions, avoir une marche égale et souvent supérieure à celle de ces
« demi-secondes du commerce, dans lesquelles on introduit des suspensions à couteau
« ou à ressort, des pendules très-lourds, des échappements à chevilles, etc., autres
« moyens considérés dans tous les cas comme de puissants éléments de régularité : tan
« il est vrai que de bonnes proportions dans la machine, une harmonie parfaite dans les
« éléments qui la composent, sont les principaux moyens d'arriver sûrement à de bons
« résultats en Horlogerie.

« Ne devant pas ici entrer dans des détails, j'appelle seulement l'attention des jeunes
« gens sur cette question trop souvent négligée.

« *P. S.* Le contenu de cette lettre est extrait d'un mémoire descriptif du nouvel échap-
« pement qui y est cité. J'ai déposé à la Société d'encouragement, en l'année 1836, ce
« mémoire et une Pendule dans laquelle cet échappement est employé, et la Pendule est
« en marche depuis lors. Cet échappement est exactement fondé sur les mêmes principes
« que ceux de M. *Kessels*, d'*Altona*, et de M. *Wulliamy*, de *Londres*, que vous publiez
« dans vos dernières feuilles, et date de pareilles époques. Je me trouve heureux de
« m'être rencontré avec deux artistes aussi supérieurs, sans qu'il ait été possible que
« nous nous entendissions. Le dépôt fait en 1836 donne une date certaine à mon travail ;
« d'autre part, vous vous souviendrez peut-être qu'il y a sept à huit ans j'ai eu l'honneur

« d'entretenir de ces mêmes matières la Société chronométrique que vous présidiez, etc.
« Paris, 18 août 1847 (1). »

On voit donc le raccourcissement des bras de l'ancre appuyé assez généralement.

Nous avons dit bien des fois que la théorie, fruit de l'instruction, doit être réunie à la pratique raisonnée, non-seulement pour des compositions nouvelles, mais même pour la simple amélioration de combinaisons déjà employées et qui paraissent susceptibles de perfection. Mais il ne faut accorder à chacun de ces deux moyens que ce qui lui appartient en propre. La théorie peut errer dans ses conséquences par la difficulté d'apprécier exactement les bases sur lesquelles elle repose, ou par l'embarras de tenir un compte exact de toutes les conditions matérielles nécessaires et indiquées par une bonne pratique; d'un autre côté, la pratique seule est trop peu éclairée pour apprécier, calculer des effets délicats et insolites. L'une doit être soutenue par l'autre, surtout quand il s'agit de compositions nouvelles. La théorie prévoit les résultats probables, et dirige même dans l'application des moyens; mais ce n'est encore qu'un essai qui peut, avec un laps de temps, se trouver contrarié par les propriétés des moyens employés et dont l'influence ne se découvre que par un long usage. Il faut donc, même avec une saine pratique, que l'expérience, soutenue assez longtemps, ait suffisamment confirmé les premiers succès. Nous l'avons déjà dit plus d'une fois; mais nous ne saurions trop rappeler ces principes, au risque de nous répéter souvent, à une époque où la fureur de nouvelles inventions plus ou moins séduisantes, bien que trop souvent fausses en principe, encourage tant de gens à chercher de prétendues améliorations que le sujet n'exige pas, ou qui n'ont point de réalité ni de suite; car on cherche aujourd'hui plus que jamais à tirer parti de sa profession par des nouveautés, plutôt qu'à faire des découvertes vraiment utiles ou importantes.

1647. Plusieurs ouvriers se persuadent aussi que la théorie est un produit de l'imagination trouvé *à priori*, et basé d'abord sur des idées abstraites : c'est une erreur. Des tentatives instinctives et une pratique dont le succès est plus ou moins pressenti forment les premières bases d'un art. La théorie ne vient qu'après; elle examine, compare et ré-

(1) Nous nous rappelons, en effet, que ce sujet fut traité, dans la Société chronométrique de Paris, vers l'époque indiquée, par M. Henry Robert, auteur de cette lettre, déjà cité honorablement dans notre ouvrage, et que son instruction met à même d'avoir une opinion motivée sur la question dont il s'agit. Un tel accord multiplié sur divers points de l'Europe n'en confirme que mieux la confiance que le sujet mérite. Nous rencontrerions sans doute un plus grand nombre de rapports semblables, si nous avions l'occasion de communiquer avec ceux qui sont, comme on dit, *en position d'avoir voix au chapitre*; mais ce que nous avons recueilli sur ce sujet suffira pour rassurer ceux qui pourraient encore en sentir le besoin; car, comme le dit un auteur célèbre, quand des hommes instruits de divers pays, et qui n'ont point eu de communication, s'accordent sur une opinion, il y a grande apparence qu'ils ont raison; nous pourrions dire ici qu'il y a certitude, d'après le grand nombre d'expériences de M. Kessels, que nous avons citées dans ce seul but. Le même nom propre porté par plusieurs autres personnes nous oblige de faire remarquer ici qu'il s'agit de M. *Henry Robert*, auteur de plusieurs mémoires approuvés par la Société d'encouragement, sur les pendules à l'usage civil et sur des pièces marines qui ont eu du succès. Ces divers mémoires, accompagnés de planches gravées, se trouvent chez lui ou à la Société d'encouragement, qui a décerné récemment à l'auteur une médaille d'or; etc.

duit en ordre des principes généraux trouvés par les premières expériences : c'est la science de l'art. Elle dirige des méthodes qu'elle n'a pas imaginées, mais qu'elle régularise; elle aide à en prévoir les résultats. Mais l'application postérieure doit toujours en être faite par une bonne et saine pratique; et, bien qu'elle soit approuvée par l'analyse, il faut toujours, en définitive, qu'un laps de temps suffisamment long en confirme la solidité; autrement on peut y être séduit, comme il n'arrive que trop souvent, et plusieurs de nos notes en avertissent.

1648. Il ne doit pas suffire non plus d'avoir trouvé une explication théorique de certains phénomènes apparents d'Horlogerie pour croire en avoir saisi la véritable cause. De telles recherches n'appartiennent qu'à ceux qui joignent à la théorie bien connue une longue pratique de l'art, et cette réunion est beaucoup trop rare, parce que les travaux difficiles et minutieux de l'artiste absorbent son temps et ne lui en laissent pas assez pour s'instruire. On conçoit que nous ne parlons ici en général que de la haute Horlogerie; mais, même dans le simple usage civil, plusieurs parties ne sont pas encore étayées de principes certains, et les proportions que l'habitude y applique sont plutôt le résultat d'un long usage qui en appuie l'emploi, que celui de principes démontrés. C'est à l'incertitude de certaines parties de l'art au milieu de la perfection de plusieurs autres, au sentiment qui souvent dirige l'artiste distingué, que l'Horlogerie doit d'être comptée au nombre des *arts libéraux*, et qui réussissent suivant le degré de cette partie de l'intelligence humaine que l'on appelle *génie*. Si tout était mathématique et démontré, il n'y aurait plus d'art; ce serait une science exacte. Si tout était pratique, ce serait une profession industrielle, un métier, quelque délicat qu'il fût. La difficulté, la rareté, l'incertitude de conceptions heureuses de l'esprit, jointes à l'habileté de la main, constituent ce qu'on appelle *art libéral*, où l'esprit et le génie ont autant de part que la pratique habile et raisonnée. Mais c'est l'œuvre du *bon génie*, comme nous l'avons dit ailleurs; tandis que le mauvais, le faux génie s'attache à des futilités séduisantes, à des compositions bizarres, aux effets subtils qui surprennent le vulgaire, et ne produit rien de solide ni d'utile ou d'estimé tel par la postérité.

D'ailleurs, chaque branche de l'Horlogerie est si étendue, que sa pratique se divise naturellement en spécialités. Tel qui a de l'expérience et du talent dans une partie, n'est pas aussi propre à en traiter une autre *ex professo;* non qu'il ne pût souvent devenir très-capable d'y bien réussir s'il s'en occupait habituellement, mais parce que, cette habitude manquant, il oublie des conditions de détail qui échappent plus ou moins. Nul n'est universel et ne doit se flatter de l'être, et c'est à peine si l'artiste le plus expérimenté voit dans sa seule partie tout ce qu'il y aurait à considérer.

1649. Quant aux compositions neuves, il est difficile que toutes les conditions avantageuses s'y trouvent d'abord réunies; c'est déjà beaucoup que de satisfaire aux principales; la perfection ne se trouve pas au premier coup, c'est presque toujours l'affaire du temps. On a vu bon nombre de compositions modernes réussir d'abord momentanément, puis manquer dans leurs effets à la longue, tandis que l'opinion publique émerveillée les comptait au nombre des chefs-d'œuvre de l'auteur, que l'expérience tardive forçait à y renon-

cer en secret, sans le dire. Que doit-on donc penser après cela de ceux qui espèrent des succès en composant au hasard, ou qui se laissent séduire par de fausses lueurs et égarer dans la recherche de propriétés idéales, ou saisies à la volée et mal comprises par l'ignorance et l'ambition? « Il est certain, » dit Sully, dans la description de sa Montre marine, imprimée à Paris en 1726, « que l'intelligence naturelle, pour grande qu'elle soit, a be« soin d'être éclairée par le savoir, et que tous deux concourent à former le jugement si « nécessaire dans tous les travaux. Les grands talents se forment autant du travail et de « l'exercice de l'esprit que de la plus heureuse disposition, qui, si elle n'est point cultivée, « n'éclate ordinairement qu'en présomptions et en futilités. » Sully raisonnait juste, et si sa Montre marine, le premier essai connu depuis Huyghens, et antérieur à Harrison, n'a pas réussi, il faut en accuser plutôt l'ignorance du temps sur les causes physiques, que l'incapacité mécanique de *Sully*, car ses recherches et ses relations avec Graham prouvent du reste un esprit solide et conséquent. Le même auteur renvoie dans cet article à une note que notre sujet nous engage à rapporter ici (1).

1650. La compensation contre les effets de la température sur le pendule, par des verges de divers métaux, telle que celle à gril de *Harrison*, dont on ne s'avisa pas d'abord de multiplier les tiges, avait été tentée, dans l'origine, au moyen de leviers qui dans le pendule même augmentaient l'effet d'une seule verge de laiton intercalée entre deux verges d'acier; ce qui manquait alors à la longueur du laiton était suppléé par ces leviers dont le plus long côté remontait la lentille; mais le côté le plus court de ces leviers,

(1) *Note de Sully.* « Un homme d'un grand mérite, ajoute Sully, me parlant, en 1716, d'une autre « personne fort distinguée, s'étonnait de voir celle-ci briller au nombre des premiers géomètres, « quoiqu'elle n'eût que vingt-sept ans. Vous seriez encore plus surpris, lui dis-je, si vous connaissiez « ses progrès dans d'autres sciences; mais ce que j'estime le plus dans ce jeune homme, c'est qu'il « est parfaitement honnête homme. — Eh! me répliqua-t-il, le moyen qu'il soit autrement? il n'a « pas eu le temps d'être vicieux!... Cette réponse était très-juste, mais elle ne dit pas assez, car « ne semble-t-il pas aussi que la rectitude d'esprit qui fait l'habile homme, fait nécessairement « l'homme de bien, l'homme vertueux? *Le malhonnête homme, au contraire, n'est jamais qu'un « petit génie; et avec toutes les finesses et les détours de son esprit, il ne pénètre que l'écorce « des choses, ne produit que du faux et ne réussit qu'en vétilles.* » (Page 267, Paris 1726, petit in-4°.)

Ceci est extrait d'un exemplaire qui a appartenu à Ferd. Berthoud et à d'autres; les dernières lignes s'y trouvent soulignées à la main et à l'encre rouge, et l'on trouve en marge écrit, avec la même encre rouge, ces deux mots : *Excellent portrait*. Nous ignorons qui l'annotateur avait en vue; mais nous pensons que si Sully avait eu le talent prophétique, il aurait pu développer sa note bien au delà. Car, si le petit génie dont il parle, trouvant un stimulant dans l'indigence, la vanité et l'ambition, parvient à séduire quelque amateur riche et ignorant, il peut en être protégé au point d'obtenir pour clientèle tous les amis de cet homme puissant, et par suite tous les riches étrangers, et se former une fausse réputation ou au moins obtenir la vogue inconsidérée qui en tient lieu. Il achètera d'abord les inventions des autres pour se les attribuer; mais bientôt, assuré de son crédit, il les usurpera sans crainte, et par son influence il corrompra pour longtemps le jugement de sa nation habituée par lui à des minuties frivoles. Ainsi ces petits esprits faux sont d'autant plus dangereux par le mal qu'ils font, qu'ils ont été plus séduisants auprès des hommes irréfléchis. Comment le public serait-il averti du piége, lorsque des hommes savants s'abaissent jusqu'à flatter, exagérer sur ce sujet les préventions du vulgaire de tous les rangs, souvent sans y croire eux-mêmes, mais pour se faire écouter par la foule?... Chacun suit le fil de son intrigue!...

appuyé sur le laiton, produit sur lui une surcharge qui s'oppose en partie à sa dilatation dans un sens, tandis qu'elle en favorise la condensation, inconvénient qu'on n'a pu dans la suite qu'alléger, sans le faire disparaître entièrement, même dans la construction de *Harrison*, quoique l'on en ait varié la disposition de plusieurs manières; tels sont, en dernier lieu, le pendule tubulaire de *Troughton*, celui de *Nicholson*, et d'autres. On en voit la disposition dans le *Traité élémentaire de mécanique* de *Kater* et *Lardner*, traduit de l'anglais par M. Pérot. Nous n'avons pas rapporté ces articles, parce que nous ne connaissons pas d'expériences suffisantes pour en confirmer l'effet et en déterminer le choix; mais nous croyons devoir indiquer ici une combinaison moderne à leviers, composée dans un sens qui atténue beaucoup l'inconvénient des anciennes méthodes et nous paraît encore un des meilleurs *pendules à levier* connus. Elle est de M. Perrelet père, et consiste en trois verges, dont celle d'acier du milieu, qui porte les centres des leviers, est accompagnée de chaque côté d'une verge de zinc de toute la hauteur du gril; elles sont toutes trois carrées méplates; les deux de zinc sont réunies du haut à celle d'acier, et s'en écartent vers le bas en appuyant sur les plus longs bras des deux leviers; les bras les plus courts supportent une traverse de peu de longueur qui soutient librement la lentille, et ils s'en partagent le poids. Il résulte d'abord de cette disposition, que le métal le plus dilatant est moins contrarié dans ses effets, et qu'en outre les deux verges de zinc attachées du haut, emploient leur propre poids à combattre la résistance de la lentille. Les leviers y ont leur centre de mouvement sur des couteaux mobiles au moyen d'une double vis de rappel dont les filets, ayant leur progression en sens opposé, changent à la fois les rapports de bras des deux leviers, de manière à régler facilement l'effet du zinc; cette construction parfaitement exécutée était appliquée à un régulateur à double cadran de secondes, marquant simultanément le temps moyen et le temps sidéral; elle obtint la première médaille pour l'Horlogerie dans une de nos expositions, et, d'après le rapport de sa bonne construction, elle fut acquise par le gouvernement: elle a été longtemps visible au Garde-Meuble, et valut à son auteur, suivant ce que nous croyons nous rappeler, le titre gratuit d'*Horloger du roi* (1).

1651. Nous avions annoncé dans le tableau provisoire de notre Prospectus la description d'une Pendule astronomique à équation, à mouvement du soleil dans le zodiaque, âge et phases de lune, quantième annuel de mois et de semaine, lever et coucher du soleil, sonnerie des quarts, etc., par Antide Janvier; nous en avions même préparé les dessins compliqués; mais ayant recommandé depuis, dans les ouvrages d'Horlogerie, l'u-

(1) Comme les compositions distinguées trouvent souvent des détracteurs, celle-ci fut critiquée par un individu qui depuis longtemps s'ingérait de juger des productions de l'Horlogerie et qui crut découvrir que ce pendule n'était qu'une copie de celui d'Ellicott, ancien et habile Horloger anglais, tandis que cette disposition neuve était tout le contraire et en évitait plusieurs défauts dont les frottements n'étaient pas les moindres. L'artiste anglais avait vidé le centre de sa platine, et celle-ci, exactement pleine, a dans sa compensation la plus grande liberté; elle agit par le côté avantageux de ses leviers, etc., etc. Mais ce faux jugement était porté par le flatteur d'une maison alors en vogue et jalouse, par un auteur qui, ayant voulu traiter des articles d'Horlogerie dans un répertoire des arts mécaniques, y avait mis presque autant de contre-sens que de lignes... *et c'est trop souvent ainsi que l'on écrit l'histoire!*

tilité et surtout la simplicité comme un des plus puissants moyens de sûreté et de régularité dans la mesure du temps, objet principal, nous avons pensé qu'il y aurait une sorte de contradiction dans un exemple tout à fait opposé, où l'auteur, séduit par certaines dispositions aussi rares heureusement que peu solides, n'avait pas, même en les appliquant, employé leurs moyens mécaniques les plus sûrs et les plus directs. Les mouvements célestes représentés par le mécanisme des rouages ont leur mérite sans doute, quand ils sont solidement établis. On y emploie une partie des moyens de l'Horlogerie, des engrenages, des leviers, même des poulies, etc. Mais ce n'est pas pour donner une mesure de temps suffisante à l'observation, et dans ce sens il n'y a pas de progrès pour cette mesure; car l'auteur, principalement attaché à produire les révolutions célestes, emploie d'ordinaire à régler la marche de ses pièces les moyens de son temps, sans s'astreindre à les améliorer, et, pour cette partie de la Pendule, un almanach est, comme nous l'avons dit ailleurs, plus économique; mais *A. Janvier* n'en a pas moins eu son vrai mérite sous ce rapport et divers autres.

1652. Quant à l'instruction, un planétaire mécanique que l'on fait mouvoir à volonté remplit mieux le but, en mettant sous les yeux les mouvements compliqués des astres dans la sphère, et même on ne s'en sert pas assez dans les cours publics. Horace dit : *Segnius irritant animos demissa per aures, quam quæ sunt oculis subjecta fidelibus :* « Le spectateur saisit mieux à la vue l'ensemble du cours des planètes, qu'il ne s'en fait une idée par le discours et par la méditation ou le calcul. » On a trop peu encouragé sous ce rapport les travaux de feu *Jambon*, qui faisait construire des planétaires à bon marché pour les établissements d'instruction; ils étaient négligemment exécutés, mais ils suffisaient, du reste, pour remplir le but (1); ce brave homme faisait des cours d'astronomie à l'aide de ses machines, et tous ses auditeurs le comprenaient, en sortaient satisfaits, et conservaient le souvenir intelligent de ce qu'ils avaient vu. Il n'en est pas de même des ouvrages de pure Horlogerie compliqués de mouvements célestes : ils ne les représentent qu'indirectement, dans une autre situation que celle de la nature; ils sont difficiles à remonter, même souvent cela devient impossible aux Horlogers qui n'ont pas la connaissance de la sphère; les pièces s'arrêtent, et, en attendant un artiste capable, elles se rouillent et se détériorent. L'usage civil exige des ouvrages simples, solides, que tout praticien d'une bonne capacité ordinaire puisse remonter et même réparer sans accidents, tels que les répétitions de *Julien Leroy*, Berthoud, Robin, Lépine, etc., que leur construction durable nous montre aujourd'hui assez bien conservées, quoique démontées fréquemment par des ouvriers ordinaires, mais toutefois soigneux. La singularité, l'étrangeté, la difficulté cherchée de l'exécution, appartiennent au charlatanisme dédaigné de tout esprit juste e consciencieux. On doit tendre au bon, à l'utile, au solide et au simple, dans l'intérêt gé-

(1) Nous avons encore M. *Rozé* qui s'en occupe à Paris avec capacité et succès, et dont les travaux en ce genre mériteraient d'être favorisés pour leur utilité réelle et la satisfaction des amateurs, outre que ce sont des ouvrages qui n'exigent pas d'entretien, n'ont point de mouvements d'Horlogerie pour en régler la marche, mais sont mus à la main par une manivelle, avec mouvement lent ou rapide; on peut en faire qui rétrogradent à volonté pour prévenir les erreurs de chronologie.

néral. Il y a peu de temps que l'on voyait courir dans les ateliers un de ces ouvrages de prétention et de caprice, une Montre du prix de 12,000 fr., acquise par un riche étranger, peu connaisseur, mais qui aimait les arts et leur faisait autant de bien que son instruction bienveillante et sa grande fortune le lui permettaient; on le regrette encore aujourd'hui. Cette pièce, distraite de sa succession et vendue par ses héritiers, avait cadran dessus et dessous, doubles secondes, quantième, équation, etc., etc.; elle ne trouvait pas un artiste qui voulût se charger de la rétablir, à cause de sa disposition singulière, et par la crainte d'une perte de temps dont le possesseur actuel, peu appréciateur, n'aurait pas assez tenu compte. Nous avons vu et l'on a vanté une autre pièce de ce genre surchargée aussi d'effets par le même auteur, dont les roues et la cage étaient en *or*, qui ne vaut pas en ce cas de bon laiton, comme solidité, et dont l'ouvrier exécuteur, que nous connaissions, nous assurait que s'il en pressait légèrement les platines, toutes les pièces des trous rebouchés pour les changements survenus dans la tête de l'auteur pendant l'exécution tomberaient en ne lui laissant entre les doigts qu'une pièce de *filigrane*. Cette pièce sans consistance était estimée un prix fou, qui en imposait aux admirateurs et aux ignorants; il y a de ceux-ci dans tous les rangs et plus qu'on ne pense; on peut mettre au même niveau ces pièces dites en cristal, où l'on admire la difficulté vaincue aux dépens d'une bonne et fidèle exécution que la matière ne permet pas, et qui ont fait courir tous les curieux, ce qui, comme mauvais exemple, mériterait plutôt une punition qu'une distinction honorable. Mais c'est parler assez d'un charlatanisme que les bons esprits rejettent et qui ne séduit que des dupes irréfléchies.

1653. Nous ne traitons pas dans cet ouvrage de diverses constructions variées, soit anciennes, soit récentes, parce que les principes généraux, lorsque l'on s'en est bien pénétré, doivent diriger dans toutes ces combinaisons. En Montre, par exemple, on a les pièces dites *perpétuelles* ou *à masse*, qui se remontent d'elles-mêmes par le *porter*, pourvu qu'on ne les laisse pas plus de deux et parfois trois jours au crochet. Cette invention *allemande*, imitée en France, renferme une forte masse de *platine* en forme de croissant, établie au bout d'un levier *horizontal* équilibré à son centre de mouvement par un petit ressort de barillet particulier, qui lui permet d'osciller de haut en bas, par le moindre mouvement imprimé à la boîte, et même par la seule respiration de celui qui la porte; au centre du levier est établi un double encliquetage très-fin et à sens opposés, qui remonte par les pignons (et avec l'avantage du cric) des roues successives, pour armer l'axe du grand ressort moteur ordinaire; il suffit d'un quart d'heure d'agitation ou de marche pour que la force motrice soit remontée entièrement. Aussi le ressort est-il toujours remonté le jour de tout ce dont il s'est désarmé dans la nuit; il y en a à répétition, et tant qu'on les porte elles sont toujours remontées tout en haut, jusqu'à un arrêt sans lequel la puissance de la masse briserait jusqu'à l'arbre du barillet. Quand cet accident a lieu, il cause de grands ravages dans la pièce (1). Un défaut de ces Montres est d'avoir presque toujours leur ressort moteur tout armé. Il y a souvent deux barillets

(1) Nous avons connu un artiste qui faisait payer fort cher ces pièces et les rétablissait sans frais, en prétextant que c'était peu de chose, une négligence d'ouvrier facile à réparer; il en était payé d'avance.

dentés pour la force motrice. L'ensemble du mouvement et de la répétition est établi sur une moitié de la platine, afin de laisser l'autre moitié libre à l'action latérale de la masse méplate, et ne pas trop élever la boîte de la Montre. Ces pièces étaient très-épaisses dans l'origine, mais on est parvenu à leur donner la proportion ordinaire de bonne force ancienne, mais non pas celle des *platitudes* d'aujourd'hui. Nous en avons vu avoir une marche très-satisfaisante, mais à la condition d'être particulièrement soignées; elles ont l'avantage de n'avoir pas besoin d'être ouvertes pour le remontage, ce qui les préserve en grande partie de la poussière.

1654. On fait aussi actuellement beaucoup de petites Pendules portatives à balancier rond, que l'on nomme Pendules de voyage, et qui marchent en quelque sens qu'elles soient placées. Elles sont à sonnerie simple, sonnerie des quarts en passant, à répétition, ou silence à volonté, réveil, quantièmes, etc. La sonnerie y est à râteau et à deux marteaux et deux timbres pour les quarts. Leurs échappements sont à cylindre, à duplex, etc., ou même à détente-ressort. Elles sont aussi bonnes chez M. H. Jacot, 25, rue Montmorency, à Paris, que celles vendues longtemps 5 ou 6 fois plus.

Une foule de constructions particulières peuvent ainsi se combiner avec succès quand on est versé dans les vrais principes de l'Horlogerie. Mais nous ne nous occuperons pas ici de ces diverses applications, vu que nous avons déjà dépassé l'étendue projetée de notre ouvrage. Nous sommes même obligé de supprimer plusieurs des tables usuelles annoncées, que l'on trouvera dans les traités spéciaux du genre, et que d'ailleurs les artistes pourront aisément calculer et dresser eux-mêmes; nous en avons donné plusieurs exemples bien suffisants. La place de ces tableaux, au fond superflus, s'est trouvée absorbée d'avance par plusieurs communications modernes que nous n'attendions pas. Si l'on s'attachait à tout dire en Horlogerie, le double de cet ouvrage serait loin de suffire, et cependant l'ensemble de ces deux forts volumes, même un peu compactes, contient la matière de quatre volumes in-4° de l'*Essai* de Berthoud. Les lecteurs qui les suivront avec attention et méditation y trouveront les moyens de suppléer à ce que nous n'avons pas dit, et qui se trouve être une conséquence immédiate des principes exposés; c'est le propre de l'in-

Nota. *Suite de la note de Sully ci-dessus, page* 504. Cet auteur plein de jugement ajoute dans une autre note ce que nous allons abréger : « Quand l'instruction ne règle pas l'imagination, des choses « ingénieuses en soi n'ont pas de succès, ou si l'on tombe par hasard sur quelque chose de bon, on « n'en sait pas tirer parti. C'est un chemin difficile que celui qui conduit par de vrais principes à de « bonnes inventions. Il me souvient d'un petit livre allemand intitulé *Wise narheit, und narisch* « *Weisheit* (en français : *Sages sottises et sottes sagesses*). Dans la 1re partie, *Sages sottises*, l'auteur « cite plusieurs inventions qui, avec l'appareil de beaucoup d'imagination et d'artifice, ne valaient rien « à la longue (nous en avons indiqué d'assez récentes). La 2e partie, *Sottes sagesses*, traite des rencon- « tres fortuites dont on n'a pas su tirer parti. L'auteur faisait la satire du génie borné des inventeurs sans « jugement ni instruction, qui obtiennent des succès momentanés comme certains billets de loterie. » Ce n'est ici que la substance de cet article, auquel on peut adjoindre cette pensée d'un ancien auteur : *Artem habent sine arte, quorum medium est mentiri; vita eorum mendicatum ire*, etc., « Ils ont de l'art sans principes, annoncent un talent qu'ils n'ont pas, ils mendient la faveur, » etc... V. l'Horl. à longitudes de Sully, dont nous avons déjà dit que, si son entreprise prématurée n'eut pas de succès, c'est moins à cet artiste sensé qu'il faut l'attribuer, qu'au défaut général de connaissances physiques et géologiques qui n'étaient pas encore bien établies à cette époque.

telligence et des dispositions pour l'art, de savoir tirer ce parti des moindres auteurs. Ceux qui ne peuvent que copier avec attention, qui sont estimables et fort utiles généralement, s'ils sont soigneux, ne doivent s'attacher qu'à ce qui est à leur portée. Il vaut mieux ne pas sortir de sa sphère que d'ambitionner, sans moyens suffisants, des degrés dont le succès n'appartient pas à tous (1).

CHAPITRE IX.

DES HORLOGES PUBLIQUES POUR CLOCHERS, CHATEAUX ET LA CAMPAGNE.

1655. Nous avons commencé ce traité par la première Horloge de Paris, établie sous Charles V en 1370, et nous le terminons aujourd'hui par une pièce de même usage, perfectionnée en 1847, après une suite de travaux variés de près de 500 ans. Dans presque toutes les inventions humaines, l'art commence par un mécanisme simple et grossier, tend ensuite à s'améliorer en se compliquant pour l'ordinaire, et d'abord sans beaucoup de succès; ensuite, revenant sur ses pas, il reprend une simplicité perfectionnée et aussi

(1) Nous venons de le dire, c'est une malheureuse manie que celle d'inventer sans nécessité, à moins que le sujet ne le requière naturellement, ou qu'il n'y ait économie marquée ou autre avantage bien positif. Nous nous rappelons que, dans notre première jeunesse, étant en province et voulant empêcher de fumer un tuyau de poêle exposé à des vents violents, nous imaginâmes un ajustage latéral à girouette, ignorant que cette machine fût alors inventée depuis quelques années; il est vrai que la nôtre avait des soupapes et autres dispositions particulières; on les a faites depuis plus simples et plus parfaites, mais il faut les soigner, car autrement elles se détériorent facilement. Une autre fois, toujours en province, et nous occupant de gravure en taille-douce, nous imaginâmes un instrument *à décalquer* qui traçait le dessin de droite à gauche sur la planche même *sans le renverser;* il est encore inédit; nous fûmes alors obligé de faire construire une *presse* d'après *Abr. Bosse*, ancien auteur inconnu dans le pays. Étant en Italie, occupé des arts du dessin, nous observâmes que la plupart des artistes qui critiquaient justement les copies de l'*antique* faites par leurs émules, tombaient eux-mêmes dans d'autres défauts, et nous imaginâmes une machine à calquer les statues, laquelle en transportait le trait sur la planche en rendant mathématiquement les proportions et la perspective. Nous étant plus tard occupé d'optique, nous essayâmes la construction de la première lorgnette de spectacle, dite double ou *jumelle*, qui fit le tour du parterre de la Comédie-Française et de celui de l'Opéra; mais comme avec deux yeux on n'y devine pas mieux les détails de l'impression fine, principal moyen d'épreuve, malgré l'apparence d'un effet plus intense sur l'organe visuel, nous y renonçâmes; nous possédons encore ce dernier instrument, et, si les brevets d'invention avaient existé alors, d'autres auraient pu tirer parti de cette nouveauté séduisante, meilleure à vendre qu'à employer, et qui est incommode sans avantage suffisant, comme nous l'avait prédit M. *Carochet*, habile opticien logé au Bureau des longitudes par M. de Lalande qui lui avait assigné le traitement d'astronome. Nous ne citons ces articles que comme exemples d'inventions de simple utilité plus ou moins importantes et motivées par le sujet. Nous avons fait mieux en Horlogerie, comme dans notre compteur des tierces peu connu, et autres améliorations; c'est là surtout qu'il faut de solides raisons pour inventer, à moins qu'on ne veuille séduire le public; mais l'erreur ne dure pas longtemps. Tout ceci, au reste, tend à prouver qu'il ne faut inventer que pour le besoin de l'art.

complète que le genre et le temps peuvent la produire (1). On a vu que les mobiles des premières Horloges d'Allemagne, et par suite de celle de la *Cité* de Paris, étaient grossièrement forgées en fer, ayant des premières roues de 3 pieds de diamètre, mues par d'énormes poids formés de blocs de pierre. Les roues étaient verticalement placées les unes au-dessus des autres, et leurs masses usant rapidement les trous des pivots faisaient pénétrer inégalement des engrenages d'ailleurs très-mal établis; l'échappement était à foliot (*voyez* la pl. Ire et son explication). La descente des poids du mouvement et de la sonnerie exigeait un espace considérable, etc.; mais, depuis, au lieu d'une vaste cage en fer, Julien Leroy y substitua un simple châssis horizontal, d'où tous les mobiles placés latéralement, c'est-à-dire à côté les uns des autres, sur une même ligne, peuvent être retirés, chacun séparément, pour les nettoyer ou les réparer, etc., sans démonter le reste. Les engrenages avaient alors été régularisés par la géométrie, et les échappements, d'abord très-variés, se réduisirent en définitive à ceux à repos, et même aujourd'hui, de préférence, à celui à repos et à chevilles de l'ancien *Lepaute*. Enfin, l'Horloge publique, sans chercher une précision plus grande que ne l'exige ce que l'on nomme l'*usage civil*, précision que d'ailleurs ses dimensions obligées ne comportent pas toujours, profita autant que son genre le permettait, de tous les perfectionnements des autres constructions qu'elle pouvait s'appliquer, et que l'on trouve rapportées dans cet ouvrage. Nous aurions pu donner pour exemple ici l'Horloge de la Bourse de Paris, de M. *Michel Lepaute*, seul descendant de la famille de ce nom, comme l'une des mieux établies; mais sa construction, trop dispendieuse pour les campagnes et la plupart des villes, nous a fait adopter l'exemple dont notre dernière pl. L donne le profil, fig. 1, et le plan horizontal tel qu'il doit être placé à plat, fig. 2, en nous bornant à quelques indications principales.

1656. Le châssis est un simple carré long, d'une seule pièce de fer fondu, ayant ses parois de champ, et portant toutes les roues et les détentes. Les roues sont épaisses et en laiton fondu; les plus grandes portent environ 15 pouces de diamètre, quoique cette Horloge-ci soit des plus fortes et comportant des timbres ou cloches de 5 à 6 mille. Nous n'entrerons pas ici dans le calcul du rouage que tout artiste doit savoir établir et dont nous avons donné tant d'exemples dans nos dernières Horloges astronomiques et autres. La longueur du pendule étant la même que celle à secondes, on conçoit que les nombres doivent avoir les mêmes rapports entre la roue de minutes, qui est ici la première du rouage, et celle de l'échappement, le tout avec pignons de 12, 10 et 9; sauf ensuite et en arrière les roues dites de temps, qui ne contribuent qu'à la durée de la marche. La plupart des grosses Horloges ne marchent d'ordinaire que 24 ou 48 heures, avec l'excédant ordinaire, pour être remontées chaque jour ou tous les deux jours. Ce n'est pas que l'on ne puisse au besoin les faire marcher plus longtemps, mais alors elles exigent des soins,

(1) L'art de faire le pain en est un exemple : ce fut pendant longtemps un aliment grossier, mal cuit et indigeste, et compliqué plus tard de divers mélanges qui le déguisaient sans le rendre meilleur. Le hasard fit trouver le *levain*, reste de pâte oubliée et aigrie, qui, mêlé à de nouvelle pâte fraîche, lui fit acquérir la légèreté et les qualités dont on est satisfait aujourd'hui et qu'il serait difficile de remplacer. Le renouvellement ainsi multiplié des levains fait la blancheur et les bonnes qualités du pain, etc.

des recherches, on y tient même l'échappement à remontoir dans l'espoir d'en obtenir plus de régularité. En dessus comme en dessous de l'Horloge astronomique à secondes, il y a perte sous ce rapport. C'est ce que l'on remarquera en lisant notre ouvrage, et si nous n'entrons pas ici dans plus de détails, c'est parce que, en règle générale, l'Horlogerie forte ou réduite ne doit être traitée que par ceux qui l'ont étudiée pour en faire profession. Ainsi, bien qu'une Horloge publique, vu son volume, semble pouvoir être exécutée par les serruriers, mécaniciens et constructeurs habiles de machines bien entendues, il n'en est pas moins constant que le plan et la direction de l'Horloge ne peuvent être confiés qu'à de vrais Horlogers. C'est une spécialité comme tant d'autres, à laquelle ne sont pas propres ceux qui n'en ont pas une longue expérience, les poids, les masses, les frottements y ayant leurs effets particuliers et relatifs aux dimensions, que l'instruction et l'usage seuls mettent à même d'apprécier (*le poids des marteaux est environ 2 p. °/₀ du timbre*).

Ici le mouvement de l'Horloge est au milieu du châssis, et porte à droite de la figure, dans son prolongement, la sonnerie des heures avec son chaperon, fig. 1 et 2, et à gauche celle des quarts qui se correspondent par les détentes, etc. La conduite des aiguilles est ajustée par enfourchement sur la pièce à deux tiges *a* et *b*, d'où elle peut être dirigée en tous sens par des engrenages d'angles soignés, et avec la liberté nécessaire à la dilatation des parties, qui, sur de longues lignes, ne laisse pas de produire un effet très-sensible. Les détentes sont indiquées en partie par leurs lettres de renvoi, *c d e*, et on peut y ajouter des bascules d'*avant-quart*, ainsi que tout autre *avertissement* de sonnerie, pour l'entrée et la sortie des ateliers, etc. Les poids tirent sur les cylindres du côté des engrenages, suivant Julien Leroy.

Lorsque l'Horloge marche 8 jours, ou lorsque les conduites des aiguilles sont très-prolongées ou fréquemment détournées, ce qu'on doit éviter autant que possible, on ajoute parfois un remontoir à l'échappement, comme nous venons de le dire, et avec plus de chances favorables qu'à la petite Horlogerie dont la susceptibilité y a fait généralement abandonner cette méthode; mais une marche de 30 heures, ou même de 60, pour un ou pour deux jours, n'a pas besoin de remontoir si la pièce est bien traitée, car la simplicité, l'exactitude et la solidité doivent être les principaux moyens de toute composition mécanique, la précision des secondes n'étant pas ici nécessaire.

A la droite de cette pl. L, nous ajoutons la fig. 3 du profil d'un des remontoirs à engrenage simple du même auteur, et au-dessous, fig. 4, son calibre indiqué. Dans la fig. 3, le volant de remontoir est transposé dans le haut par supposition, mais il est réellement placé vers la hauteur de la 2ᵉ roue. Ce genre de mécanisme a été très-varié; l'auteur en a composé plusieurs. ainsi que des échappements à chevilles modifiés, et diverses compensations du pendule; mais souvent on y préfère la verge en sapin vernissé, employée même dans de bons régulateurs ordinaires. Le haut de la verge est ici en métal pour le vide circulaire qui doit laisser passer librement le carré de remontage. La lentille d'un pied de diamètre pèse environ 40 livres. Le surplus des détails sera suppléé par ceux qui sont en état de les concevoir. Les brevets ne garantissent pas toujours, et la facilité des

patentes est un fléau pour l'art comme pour le public. Nous savons que nos citations d'artiste ne conviennent pas à bien des gens..... *genus irritabile vatum.....*, mais nous sommes historien, et si nous avons pu et dû critiquer les anciens auteurs, nous devons parler avec impartialité des modernes, quels qu'ils soient, sans les juger définitivement, ce qui n'appartient qu'à la postérité; et nous-même, plus habitué à manier la lime et le compas que la plume, nous avons à nous recommander à son indulgence.

P. S. Nous avons observé la même retenue pour les Pendules de voyage dont la cadrature de répétition à râteau nous paraîtrait applicable aux Pendules d'appartement, avec cordon pour alcôve, etc., mais seulement dans les pays dont les habitants ne *troquent* pas de logement tous les trois mois. Nous devons encore ajouter, relativement aux Montres à masse dont nous n'avons dit que deux mots, que M. *Vincent* de *Belleville* n'y mettait d'arrêt de masse que dans le bas et n'y éprouvait pas d'accidents.

1657. Les administrateurs des villes et campagnes doivent s'adresser aux établissements renommés, qui sont à même d'exécuter mieux, tout en réduisant leurs prix par la facilité qu'offrent de grands ateliers bien outillés. La gravure de l'Horloge ci-dessus est d'après les dessins de M. Jean Wagner neveu, Horloger, 118, rue Montmartre, établissement distingué par des médailles d'argent et d'or et trop connu pour avoir besoin d'éloges; on y trouve aussi d'excellents métronomes pour la musique. La ville de Paris n'offre qu'un très-petit nombre d'artistes habiles en Horloges, pour la France et l'étranger. *D'autres articles promis pourront être réunis dans un supplément.*

NOTA. Il me reste à dire, en terminant ce traité d'Horlogerie qui manquait depuis très-longtemps, que son exécution ne s'est trouvée différée qu'à son avantage, vu ce que l'art a acquis dans cet intervalle. Voici la cause de ce retard qu'un accident a rendu utile. J'avais commencé, il y a nombre d'années, les premiers chapitres du traité actuel, et je les avais communiqués dans l'intimité à un artiste âgé et alors fort en vogue; celui-ci me persuada d'entreprendre en place la rédaction de ses propres travaux dont il avait fait faire des dessins; ce nouveau travail devait avoir lieu moyennant des conditions particulières à fixer entre nous, qui ne furent d'abord que verbales. Mais à la longue, le sujet mieux examiné ne répondant point à mon attente, je m'en dégoûtai peu à peu, et l'ouvrage, ralenti, négligé, presque oublié, se trouvait à moitié ébauché, lorsque cet ami vint à décéder. Je gardais près de moi mon manuscrit dont les conditions n'étaient pas remplies, lorsque l'héritier le réclama à titre gratuit, comme un produit de l'artiste décédé, qui m'aurait dirigé dans ce travail; ce qui n'était pas. Je refusai d'abord; mais ensuite j'en accordai à ses sollicitations une copie à ses frais. Il accepta; et la copie était en train, lorsque cette facilité ne lui suffisant plus, il sollicita et obtint l'autorisation de faire saisir chez moi tous mes papiers concernant l'Horlogerie. Un procès fut entamé. Le célèbre M. D. était l'avocat de ma partie adverse, que M. Mér..., non moins célèbre, était chargé de poursuivre. Comme je témoignais un jour à celui-ci l'appréhension d'une influence défavorable : « Et si je « vous disais, me répliqua-t-il, que M. D. m'a déjà proposé d'accommoder l'affaire, et que j'ai refusé, « n'ayant pas même voulu vous en parler?... Or, un avocat qui a confiance en son talent n'a pas l'ha- « bitude d'accommoder une affaire seulement douteuse, etc. » A cette époque personne ne connaissait nombre de lettres de mon vieil ami, pleines d'éloges, d'invitations pressantes à venir de la province l'aider dans ses travaux, et surtout d'aveux fort *curieux;* je ne m'en vantais pas, mais j'aurais été obligé de les publier dans l'impression de mon mémoire, où ils auraient ouvert les yeux à bien des gens! (Ces lettres existent encore, mais loin de moi et en sûreté.) Mon vieil ami, s'il eût vécu, aurait été mieux avisé!... Enfin, après quelque temps, fatigué de ces procédures qui répugnent tant aux gens de lettres, persuadé qu'un mauvais arrangement est préférable aux débats de la meilleure cause, n'attachant aucune importance à l'ouvrage ébauché, je consentis à la vente de mon manuscrit par acte notarié, et ce fut ainsi que se termina cette affaire à laquelle je n'ai plus pensé. La pierre qui se détache d'une *ruine* peut blesser l'observateur, mais elle ne peut l'offenser. Je ne rappelle donc ici cette anecdote que pour expliquer l'issue de l'affaire à ceux qui ne la connaissent pas, et comme une des principales causes du retard de la publication du traité actuel, en assurant à mes lecteurs qu'il ne contient pas un mot de l'ancienne ébauche citée, et dont, sous le rapport des principes de l'art, ils n'ont, à mon avis, rien à regretter.

CHAPITRE X.

CHAPITRE X.

Ce 10[e] chapitre du tome II, le 20[e] et dernier de tout l'ouvrage, se compose d'un article oublié et de quelques tables utiles : 1° de la comparaison des mesures linéaires et des poids anciens et nouveaux extraits de l'*Annuaire du bureau des longitudes;* 2° des deux 1[res] pages des tables de logarithmes dont les *nombres* suffisent ici aux exemple donnés dans les paragraphes 1392 et suivants, où l'usage en est indiqué; 3° du tableau des expériences faites à l'Observatoire et communiquées à l'Académie des sciences su l'isochronisme obtenu par les deux ressorts de suspension d'un pendule; 4° de la table de M. Wulliamy pour les proportions de l'échappement à ancre de Graham perfectionné; 5° d'une autre table relative à des expériences particulières, citées au paragraphe 1646, et conformes aux résultats précédents.

PLANCHE LI[e].

L'article oublié concernant les Montres est une disposition du piton de spiral, qui peut avoir son avantage dans les pièces soignées à l'usage civil, et même dans les petits Chronomètres de poche; les détails en sont gravés au bas de notre planche 51° et seront aisément compris des artistes auxquels ils sont destinés. Il s'agit ici de disposer un coq à l'anglaise de manière à porter un bras latéral formé d'une double plaque d'acier trempé et revenu, ayant chacune une rainure chanfrinée en dedans et capable de serrer, au moyen de ses quatre vis, la petite sphère d'acier formant la tête du piton, afin que, les vis étant desserrées d'abord, celui-ci prenne librement sa position exigée par le ressort, et qu'en serrant les vis cette position n'en soit nullement altérée.

Une autre propriété de cette construction, c'est que le même bras peut tourner de quelques degrés, et à frottement doux, sur le centre de l'échappement, étant maintenu sur le coq par un disque à trois vis, à bord chanfriné en contre-bas, et qui porte le rubis du pivot supérieur du balancier. L'autre bras opposé et moins long du coq, adhérent de même pièce à ce coq, est aussi recouvert d'une plaque à deux vis, et entre deux se trouve un pignon d'acier percé d'un trou carré et engrenant avec le cercle du grand bras de piton pour mouvoir celui-ci et chercher, après le remontage, le point précis d'échappement, sans déranger le piton dans sa position définitive, à l'égard du spiral, et sans extravaser les huiles de l'échappement, comme il arrive lorsque l'on est obligé de retirer le balancier pour les retouches; enfin, cette armature peut porter, au besoin, un compensateur pour l'usage civil, ainsi que notre nouveau pare-chute. Le coq peut aussi être établi sur un chariot à l'ordinaire. Dans la première construction de cette espèce dont nous avons eu connaissance, l'artiste qui l'avait employée ne formait pas la tête du piton en sphère, mais de deux cônes opposés par leur base, ce qui devait nécessairement brider le spiral dans un sens; tandis que la forme sphérique que nous lui donnons est essentielle pour que le serrage des deux plaques du bras prenne et arrête le piton dans sa position voulue par le spiral, sans brider celui-ci aucunement. Ce même dessin ayant été vu par un plagiaire ignorant dont nous avons parlé ailleurs, l'exécution en fut exposée par lui, s'en prétendant l'inventeur, devant une société savante, comme moyen, pour le propriétaire, de remettre lui-même sa Montre *en échappement* lorsque, disait-il, les huiles en étaient épaissies, et dans la fausse supposition que cet épaississement dérangerait le point d'échappement; enfin, comme si un particulier, propriétaire, pouvait juger de ce point et faire usage d'un moyen établi uniquement pour le travail de l'artiste. L'approbation qu'il reçut à ce sujet le mit à même de trouver des fonds pour s'établir en belle position, où, au moyen d'ouvriers dont le moins capable en savait plus que lui, il parvint à faire une petite fortune, au point de céder récemment son établissement avec avantage. *Sic vos non vobis*, etc. *Ainsi, mais non pour vous, laborieuses abeilles*, etc... Mais nous ne crûmes pas que ce léger perfectionnement valût une réclamation.

Notre table des mesures anciennes et nouvelles, extraite de l'Annuaire du bureau des longitudes de France, n'est étendue qu'à peu de nombres, dont la multiplication, facile, permettra de s'en servir aisément pour de plus grands. On trouve dans cet Annuaire une table d'équation du temps moyen au midi solaire, pour tous les jours de l'année. Cet ouvrage, de petite apparence, mais très-utile, est donné plutôt que vendu au prix de 1 fr., bien modique si l'on considère qu'il est presque tout en chiffres,

dont la composition, et surtout la correction, est plus dispendieuse et plus difficile que celle d'un texte ordinaire. Bien des appréciateurs de cet ouvrage desireraient qu'il fût divisé en deux parties, dont la première pourrait paraitre quelques jours avant le nouvel an, sans être retardée par les notes scientifiques, très-intéressantes d'ailleurs, mais qui ne peuvent pas toujours être prêtes à temps. Pour la table d'équation, ceux qui tiennent à la précision des secondes et des dixièmes doivent s'en procurer au moins cinq années de suite, d'une bissextile à l'autre, à raison des petites différences entre ces diverses années; outre cette utilité directe pour l'Horlogerie, ils y trouveront une foule d'observations exactes, souvent précieuses, et toujours notables, pour ceux qui cherchent l'instruction (1).

Quant à l'ouvrage que nous terminons ici, ce qui pourrait en excuser les défauts serait l'inexpérience de l'auteur dans un premier essai d'impression; l'abandon forcé de ses anciens cahiers, ce qui en a rendu les livraisons presque improvisées, malgré la lenteur de l'exécution; la privation de conseils sur la rédaction, faute d'amateurs assez instruits dans la partie, ou ayant assez de loisirs (nous avons dit ailleurs que Lepaute fut revu et corrigé par MM. *de Lalande* et *Berthoud*, par l'abbé *de la Caille*, astronomes et hommes de lettres); et de plus, cette distribution en livraisons successives de loin en loin, et qui rompt la suite de l'ensemble; enfin la rapacité et l'infidélité de la plupart des gens employés, dont cependant il faut bien distinguer : 1° le graveur actuel des figures, M. *Wormser*, rue de *l'Abbé-Suger*, n° 9, artiste de talent comme dessinateur et peintre, et qui, s'il avait été connu plus tôt par l'auteur, aurait gravé toutes les planches, à la satisfaction générale; 2° M. *Douchin*, l'un de nos plus habiles graveurs en lettres ornées, qui a gravé la lettre de nos planches, genre très-inférieur à son beau talent, rue *J.-J. Rousseau*, vis-à-vis celle *Verdelet*, n° 20; 3° enfin le deuxième imprimeur actuel du texte auquel nous nous sommes trouvé forcé de recourir, M. Malteste, rue des Deux-Portes-St-Sauveur, n° 18, dont l'auteur n'a qu'à se louer. Nous ne parlerons pas ici de quelques malveillances, qui attaquent si souvent la publicité et ne méritent pas l'honneur d'être citées. Ces inconvénients excuseront peut-être, en partie, la faiblesse de l'exécution.

(1) Lorsque nous avons préconisé l'instruction dans plusieurs de nos articles, nous n'avons entendu parler que des connaissances de mécanique et surtout du calcul mathématique, si utile dans bien d'autres cas, et des premières notions de physique et du dessin linéaire, connaissance que l'on peut acquérir dans les cours publics. Il n'appartient, en effet, qu'aux savants de profession d'approfondir les sciences; les artistes n'ont pas le temps de s'y livrer. D'ailleurs, trop d'instruction chez certains hommes est souvent une arme dangereuse mise entre les mains d'un enfant. Le philosophe (l'*ami de la sagesse*) sait dompter ses passions et n'abuse pas de ses connaissances pour faire le mal, ce qui arrive aujourd'hui plus facilement que jamais à l'inexpérience passionnée et égarée. Le vrai philosophe reconnaît une puissance suprême régissant l'univers appelé par nous la *nature*, que nous connaissons encore si peu, que nous ne connaîtrons même jamais complétement, mais dont nous sentons la tendance évidente à l'amélioration des sociétés humaines et à la destruction des vices qui leur nuisent. Son action marche par oscillations plus ou moins lentes. Elle semble reculer parfois; mais, avançant ensuite davantage, elle est toujours progressive dans le sens du mieux; si la nature détruit, elle répare ensuite avec amélioration. C'est par la puissance de la nature et l'intention de son suprême auteur, que les travers, les vices et les crimes sont proscrits et punis, soit dans les individus coupables, soit dans leur postérité, quand elle est une prolongation de leur caractère. *Le principe réparateur est, dans la nature, une suite de celui de la production.* Si la correction est souvent lente, elle est aussi plus puissante. L'homme vicieux, ciron imperceptible, est un insensé qui entreprend de résister à la tendance de la nature vers le bien, pour satisfaire ses passions; il finit par succomber, lui ou sa race. Tout ceci est évident pour le *sage*, qui prend pour règle de sa conduite de ne faire à personne ce qu'il ne voudrait pas éprouver, et de rendre aux autres, dans l'occasion, les services qu'il désirerait en obtenir en pareil cas. Alors, ne nuisant à personne, le sage jouit en général d'une sécurité dont l'homme vicieux ou criminel ne peut être assuré, même en s'isolant de la société, qui, d'ailleurs, finissant par le connaître, le rejetterait de son sein, intéressée qu'elle est naturellement à poursuivre le mal. Un auteur moderne et sensé compare le tourment du vicieux au tressaillement de l'araignée, quand elle voit sa toile perfide menacée de quelque dommage, et que, suspendue au centre, elle examine avec inquiétude quel point aura besoin de son secours. C'est une partie, et non la plus légère, du châtiment de celui qui, abandonnant le sentier de la droiture, cherche à satisfaire ses passions par le chemin tortueux de l'intrigue et de la perfidie. Cette morale est universelle; elle appartient à tous les principes sociaux : les anciens et les modernes sont tous parfaitement d'accord sur ce sujet. Horace a dit : *Raró antecedentem scelestum deseruit pœna pede claudo.* La justice, quoique lente, ne perd pas de vue le criminel; et ailleurs : *Sedet post equitem atra cura,* maximes paraphrasées dans les vers suivants :

C'est vainement qu'une fuite rapide
Lui fait franchir les vallons, les torrents.
Il semble en vain lutter avec les vents,
Ce compagnon, pâle et livide,
Le souci, monte en croupe et galope avec lui.
. . . .

Un autre auteur a dit dans le même sens, de l'homme vicieux ou criminel :

Le remords le poursuit, limier infatigable;
Souvent dans la jeunesse on est sourd à sa voix.
Mais quand l'âge et le temps nous ont mis aux abois,
Nous ne pouvons alors le fuir ni le combattre,
Sous ses traits acérés nous nous sentons abattre;
Il sait se faire entendre et vient nous avertir
Que le pouvoir vengeur s'apprête à nous punir.

COMPARAISONS MUTUELLES DES MESURES LINÉAIRES ET POIDS DE FRANCE ANCIENS ET NOUVEAUX

(*Extraites de l'*Annuaire du Bureau des Longitudes, *recueil d'une foule de renseignements utiles et curieux.*)

RÉDUCTION

DES LIGNES EN MILLIM. avec leurs FRACTIONS DÉCIMALES.		DES MILLIM. EN LIGNES avec leurs FRACTIONS DÉCIMALES.		DES CENTIM. EN PI. PO. LIG. avec leurs FRACTIONS DÉCIMALES.		DES DÉCIM. EN PI. POUC. LIG. avec leurs FRACTIONS DÉCIMALES.	
lignes.		millim.		centim.	pied po. lign. fr. d.	décim.	pieds. po. lign. fr. d.
1.	1 ,256	1.	0 ,443	1.	0...0...4 ,433	1.	0...3...8 ,330
2.	2 ,512	2.	0 ,887	2.	0...0...8 ,866	2.	0...7...4 ,659
3.	6 ,767	3.	1 ,330	3.	0. .1...1 ,299	3.	0.11...0 ,989
4.	9 ,023	4.	1 ,773	4.	0...1...5 ,732	4,	1.. 2...9 ,318
5.	11 ,279	5.	2 ,216	5.	0...1.10 ,165	5.	1...6...5 ,648
6.	13 ,535	6.	2 ,660	6.	0...2...2 ,598	6.	1.10...1 ,977
7.	15 ,791	7.	3 ,103	7.	0...2...7 ,031	7.	2...1.10 ,307
8.	18 ,047	8.	3 ,546	8.	0...2.11 ,464	8.	2...5...6 ,637
9.	20 ,302	9.	3 ,990	9.	0...3...3 ,897	9.	2...9...2 ,966
10.	22 ,558	10.	4 ,433	10.	0...3...8 ,330	10.	3...0.11 ,296

COMPARAISONS MUTUELLES DES POIDS ANCIENS ET NOUVEAUX.

RÉDUCTION

DES GRAINS EN GRAMMES et leurs FRACTIONS DÉCIMALES.		DES GROS EN GRAMMES et leurs FRACTIONS DÉCIMALES.		DES ONCES EN GRAMMES et leurs FRACTIONS DÉCIMALES.		DES LIVRES EN KILOGRAMMES et leurs FRACTIONS DÉCIMALES.	
grains.	grammes.	gros.	grammes.	onces.	grammes.	livres.	kilogr.
10.	0 ,53	1.	3 ,82	1.	30 ,59	1.	0 ,4895
20.	1 ,06	2.	7 ,65	2.	61 ,19	2.	0 ,9790
30.	1 ,59	3.	11 ,47	3.	91 ,78	3.	1 ,4685
40.	2 ,12	4.	15 ,30	4.	122 ,38	4.	1 ,9580
50.	2 ,66	5.	19 ,12	5.	152 ,97	5.	2 ,4475
60.	3 ,19	6.	22 ,94	6.	183 ,56	6.	2 ,9370
70.	3 ,72	7.	26 ,77	7.	214 ,16	7.	3 ,4265
72.	3 ,82	8.	30 ,59	8.	244 ,75	8.	3 ,9160

RÉDUCTION

DES GRAMMES EN ONCES, GROS, GRAINS.		KILOGR. EN LIVRES, ONCES GROS, GRAINS.		GRAMMES EN GRAINS.		DÉCIGRAMMES EN GRAINS ET LEURS FRACTIONS DÉCIM.	
	liv. onc. gro. grain.		liv. onc. gro. grain.	gramm.	grains fr. déc.	décigr.	grains fr. déc.
1.	0...0...0..19	1.	2...0...5..35	1.	18 ,8	1.	1 ,9
2.	0...0...0..38	2.	4...1...2..70	2.	37 ,6	2.	3 ,8
3.	0...0...0..56	3.	6...2...0..33	3.	56 ,5	3.	5 ,6
4.	0...0...1...3	4.	8...2...5..69	4.	75 ,3	4.	7 ,5
5.	0...0...1..22	5.	10...3...3..32	5.	94 ,1	5.	9 ,4
6.	0...0...1..41	6.	12...4...0..67	6.	113 ,0	6.	11 ,3
7.	0...0...1..60	7.	14...4...6..30	7.	131 ,8	7.	13 ,2
8.	0...0...2...7	8.	16...5...3..65	8.	150 ,6	8.	15 ,1

NOTA. — Les *anciennes* fractions sexagésimales sont exprimées rigoureusement justes; mais les fractions décimales, bien qu'approximatives, ont l'avantage de faciliter les grands calculs de ce genre, leurs approximations pouvant être réduites indéfiniment en multipliant les décimales à volonté. Les *unités* décimales ne sont exprimées que de 5 en 5; elles ont donc de 1 à 4 unités inférieures en plus ou en moins, ce dont on s'aperçoit en multipliant les nombres. Mais ces dernières unités peuvent aisément se réduire, à un degré insensible dans l'exécution, en multipliant davantage les décimales.

(La toise anglaise est à peu près de 5 pieds 6 à 7 pouces de France. V. l'*Annuaire* susdit pour le détail.)

NOMBRES.	LOGARITHMES.	NOMBRES.	LOGARITHMES.	NOMBRES.	LOGARITHMES.
1	0 ,0000000	34	1 ,5314789	67	1 ,8260748
2	0 ,3010300	35	1 ,5440680	68	1 ,8325089
3	0 ,4771213	36	1 ,5563025	69	1 ,8388491
4	0 ,6020600	37	1 ,5682017	70	1 ,8450980
5	0 ,6989600	38	1 ,5797836	71	1 ,8512583
6	0 ,7781513	39	1 ,5910646	72	1 ,8573325
7	0 ,8450980	40	1 ,6020600	73	1 ,8633229
8	0 ,9030900	41	1 ,6127839	74	1 ,8692317
9	0 ,9542425	42	1 ,6232493	75	1 ,8750613
10	1 ,0000000	43	1 ,6334685	76	1 ,8808136
11	1 ,0413927	44	1 ,6434527	77	1 ,8864907
12	1 ,0791812	45	1 ,6532125	78	1 ,8920946
13	1 ,1139434	46	1 ,6627578	79	1 ,8976271
14	1 ,1461280	47	1 ,6720979	80	1 ,9030900
15	1 ,1760913	48	1 ,6812412	81	1 ,9084850
16	1 ,2041200	49	1 ,6901961	82	1 ,9138139
17	1 ,2304489	50	1 ,6989700	83	1 ,9190781
18	1 ,2552725	51	1 ,7075702	84	1 ,9242793
19	1 ,2787536	52	1 ,7160033	85	1 ,9294189
20	1 ,3010300	53	1 ,7242759	86	1 ,9344985
21	1 ,3222193	54	1 ,7323938	87	1 ,9395193
22	1 ,3424227	55	1 ,7403627	88	1 ,9444827
23	1 ,3617278	56	1 ,7481880	89	1 ,9493900
24	1 ,3802112	57	1 ,7558749	90	1 ,9542425
25	1 ,3979400	58	1 ,7634280	91	1 ,9590414
26	1 ,4149733	59	1 ,7708520	92	1 ,9637878
27	1 ,4313638	60	1 ,7781513	93	1 ,9684829
28	1 ,4471580	61	1 ,7853298	94	1 ,9731279
29	1 ,4623980	62	1 ,7923917	95	1 ,9777236
30	1 ,4771213	63	1 ,7993405	96	1 ,9822712
31	1 ,4913617	64	1 ,8061800	97	1 ,9867717
32	1 ,5051500	65	1 ,8129134	98	1 ,9912261
33	1 ,5185139	66	1 ,8195439	99	1 ,9956352
				100	2 ,0000000

NOMBRES.	LOGARITHMES.	NOMBRES.	LOGARITHMES.	NOMBRES.	LOGARITHMES.
101	2 ,0043214	134	2 ,1271048	167	2 ,2227165
102	2 ,0086002	135	2 ,1303338	168	2 ,2253093
103	2 ,0128372	136	2 ,1335389	169	2 ,2278867
104	2 ,0170333	137	2 ,1367206	170	2 ,2304489
105	2 ,0211893	138	2 ,1398791	171	2 ,2329961
106	2 ,0253059	139	2 ,1430148	172	2 ,2355284
107	2 ,0293838	140	2 ,1461280	173	2 ,2380461
108	2 ,0334238	141	2 ,1492191	174	2 ,2405492
109	2 ,0374265	142	2 ,1522883	175	2 ,2430380
110	2 ,0413927	143	2 ,1553360	176	2 ,2455127
111	2 ,0453230	144	2 ,1583625	177	2 ,2479733
112	2 ,0492180	145	2 ,1613680	178	2 ,2504200
113	2 ,0530784	146	2 ,1643529	179	2 ,2528530
114	2 ,0569049	147	2 ,1673173	180	2 ,2552725
115	2 ,0606978	148	2 ,1702617	181	2 ,2576786
116	2 ,0644580	149	2 ,1731863	182	2 ,2600714
117	2 ,0681859	150	2 ,1760913	183	2 ,2624511
118	2 ,0718820	151	2 ,1789769	184	2 ,2648178
119	2 ,0755470	152	2 ,1818446	185	2 ,2671717
120	2 ,0791812	153	2 ,1846914	186	2 ,2695129
121	2 ,0827854	154	2 ,1875207	187	2 ,2718426
122	2 ,0863598	155	2 ,1903317	188	2 ,2741578
123	2 ,0899051	156	2 ,1931246	189	2 ,2764618
124	2 ,0934217	157	2 ,1958997	190	2 ,2787536
125	2 ,0969100	158	2 ,1986571	191	2 ,2810334
126	2 ,1003705	159	2 ,2013971	192	2 ,2833012
127	2 ,1038037	160	2 ,2041200	193	2 ,2855573
128	2 ,1072100	161	2 ,2068259	194	2 ,2878017
129	2 ,1105897	162	2 ,2095150	195	2 ,2900346
130	2 ,1139434	163	2 ,2121876	196	2 ,2922561
131	2 ,1172713	164	2 ,2148438	197	2 ,2944662
132	2 ,1205739	165	2 ,2174839	198	2 ,2966652
133	2 ,1238516	166	2 ,2201081	199	2 ,2988531
				200	2 ,3010300

RÉSUMÉ DES EXPÉRIENCES SUR LES RESSORTS DE SUSPENSION

(Page 492, § 1642.)

	Durée de 2,000 oscillations exprimées en secondes sidérales. Amplit. de 1 degré.	Amplit. de 3 degrés.	Amplit. de 5 degrés.
	s.	s.	s.
Expérience n° I. Lentille de 2 kilog. Ressorts (A).	1976,91	1975,73	1974,48
	1976,83	1975,78	1974,43
	1977,21	1975,74	1974,26
	1977,13	1975,70	1974,47
	1977,05	1975,86	1974,17
	1977,00	1975,90	1974,46
	1976,90	1975,89	1974,16
	»	1975,98	1974,55
	»	1976,08	1974,48
	»	»	1974,39
	»	»	1974,26
Moyennes.	19,7700	1975,86	1794,37
Expérience n° II. Lentille de 4 kilog. Ressorts (A).	2010,43	2009,85	2008,99
	2010,52	2009,77	2008,93
	2010,60	2009,85	2008,90
	2010,67	2009,74	2008,96
	2010,57	2009,98	2008,98
	2010,51	2009,84	2008,91
Moyennes.	2010,55	2009,84	2008,93
Expérience n° III. Lentille de 6 kilog. Ressorts (A).	2020,30	2019,75	2019,25
	2020,32	2019,79	2019,34
	2020,31	2019,73	2019,21
	2020,25	2019,94	2019,25
	2020,34	2019,79	2019,31
	2020,32	2019,82	2019,49
	2020,33	2019,85	2019,35
	»	2019,74	2019,44
	»	2019,82	2019,38
	»	2019,80	2019,38
Moyennes.	2020,31	2019,80	2019,34
Expérience n° IV. Lentille de 8 kilog. Ressorts (A).	2027,03	2026,60	2026,32
	2027,01	2026,66	2026,42
	2027,04	2026,72	2026,40
	2027,09	2026,69	2026,31
	2027,05	2026,66	2026,44
	2027,02	2026,74	2026,39
	»	2026,71	2026,35
Moyennes.	2027,04	2026,68	2026,38

	Durée de 2,000 oscillations exprimées en secondes sidérales. Amplit. de 1 degré.	Amplit. de 3 degrés.	Amplit. de 5 degrés.
	s.	s.	s.
Expérience n° V. Lentille de 4 kilog. Ressorts (B).	2024,94	2024,99	2024,99
	2024,94	2025,04	2024,96
	2024,97	2024,97	2025,02
	2024,93	2025,01	2025,01
	2024,97	2024,99	2024,98
	2024,95	2025,00	2025,00
	2024,96	2024,94	2024,99
	2024,98	2025,02	»
	»	»	»
	»	»	»
	»	»	»
Moyennes.	2024,96	2024,99	2024,99
Expérience n° VI. Lentille de 6 kilog. Ressorts (B).	2030,30	2030,37	2030,36
	2030,28	2030,35	2030,38
	2030,28	2030,36	2030,39
	2030,27	2030,32	2030,38
	2030,29	2030,32	2030,37
	2030,26	2030,34	2030,37
Moyennes.	2030,28	2030,34	2030,37
Expérience n° VII. Lentille de 8 kilog. Ressorts (B).	2034,82	2034,91	2034,98
	2034,81	2034,94	2035,00
	2034,83	2034,91	2034,99
	2034,80	2034,90	2035,00
	2034,81	2034,93	»
	2034,79	2034,91	»
	»	2034,92	»
	»	»	»
	»	»	»
	»	»	»
Moyennes.	2034,81	2034,81	2034,99

* Nota. — Les ressorts (A) ont 5 millimètres de largeur, $\frac{24}{100}$ de millimètre d'épaisseur, et 1 millimètre de longueur, éloignés entre eux de deux à trois pouces.

Les ressorts (B) ont même largeur et même épaisseur que les premiers ressorts ; leur longueur est de 3 millimètres.

L'amplitude est le double de l'angle que fait le pendule avec la verticale.

* Il y a deux ressorts à chaque suspension. (Le tout copié de l'original, sauf erreur typographique possible de ses chiffres.)

Table de M. Wulliamy relative au paragraphe 1639 et page 488.

MESURES D'UN ÉCHAPPEMENT A ANCRE ET A REPOS. V. PL. L.

OUVERTURE des PALETTES.		DISTANCES des CENTRES.	ARCS DE REPOS.	
Nombre de dents.	Angle I, X Y.	Ligne I, X.	Rayon de l'extérieur I, G.	Rayon de l'intérieur I, D.
2	9°	1. 0111	0. 2105	0. 1058
3	15°	1. 0338	0. 3199	0. 2152
4	21°	1. 0697	0. 4357	0. 3310
5	27°	1. 1208	0. 5612	0. 4565
6	33°	1. 1907	0. 7009	0. 5962
7	39°	1. 2850	0. 8610	0. 7563
8	45°	1. 4123	1. 0510	0. 9463
9	51°	1. 5868	1. 2855	1. 1809
10	57°	1. 8335	1. 5900	1. 4854
11	63°	2. 1996	2. 0122	1. 9076
12	69°	2. 7866	2. 6538	2. 5492
13	75°	3. 8583	3. 7792	3. 6746

PLAN D'IMPULSION avec ARC DE LEVÉE D'UN DEGRÉ.			PLAN D'IMPULSION avec ARC DE LEVÉE DE DEUX DEGRÉS.		
Angle d'élévation D, G, d.	Hauteur du plan d'imp. ou levée D d.	Longueur du plan d'imp. ou levée G d.	Angle d'élévation D, G, d.	Hauteur du plan d'imp. ou levée D d.	Longueur du plan d'imp. ou levée G d.
2° 1′	0. 0037	0. 1047	4° 1′	0. 0074	0. 1049
3° 3′	0. 0056	0. 1048	6° 5′	0. 0112	0. 1053
4° 9′	0. 0076	0. 1049	8° 16′	0. 0152	0. 1058
5° 21′	0. 0098	0. 1051	10° 36′	0. 0196	0. 1065
6° 40′	0. 0122	0. 1054	13° 9′	0. 0244	0. 1075
8° 10′	0. 0150	0. 1058	16° 1′	0. 0300	0. 1089
9° 56′	0. 0183	0. 1063	19° 19′	0. 0366	0. 1109
12° 6′	0. 0224	0. 1071	23° 12′	0. 0448	0. 1139
14° 51′	0. 0278	0. 1083	27° 56′	0. 0556	0. 1185
18° 33′	0. 0351	0. 1104	33° 52′	0. 0702	0. 1261
23° 52′	0. 0463	0. 1145	40° 30′	0. 0926	0. 1398
32° 13′	0. 0660	0. 1236	51° 34′	0. 1320	0. 1723

Voiti pour le mode de calcul.

Dans cette table les mesures sont exprimées en décimales du *rayon* de la roue *pris* pour unité et calculées pour toutes ouvertures de palettes, de 2 jusqu'à 13 dents, la roue étant supposée de 30, et les arcs de levée de 1° à 2°.

Expériences relatives à la lettre citée au paragraphe 1646, *et annoncées page* 501 *du second volume.*

NATURE de L'ÉCHAPPEMt.	POIDS de LA LENTILLE.	La Pendule étant réglée sur le temps moyen, donne pour différence diurne résultant de: La pression sur les repos.	La plus grande amplitude des arcs.	TOTAL de la différence, la force 2 étant remplacée par celle 3.	ÉTENDUE DES ARCS: La force étant 2.	La force étant 3.	De levée.	Longueur des bras des leviers.
GRAHAM.	24 onces	— 8′ 7	— 2″ 7	— 11″	2° 1	2° 45	0° 8	0m 0110
	7	—20 5	— 2 5	— 23	2° 4	2° 70		
	2 1/2	—16 0	— 7 0	— 23	2° 7	3° 40		
Échappemt nouveau.	24 onces	— 3′ 2	— 2 8	— 6	1° 9	2° 30	1° 2	0m 0055
	10	— 5 0	— 3 5	— 10	2° 2	2° 70		
	2 1/2	— 8 2	— 5 8	— 14	2° 6	3° 20		
Repos d'un côté, recul de l'autre.	4 onces	— 3″ 0 [1]	— 9 0	— 12	3° 2	4° 00	2° 3	0m 0060
	2 1/2	— 2 0	—12 0	— 14	3° 2	4° 20		
	1 1/2	— 4 0	—12 0	— 16	4° 2	5° 00		
Grand recul.	4 onces	+ 0″ 5 [2]	— 5″ 5	— 5	3° 2	3° 70	2° 4	0m 0060
	2 1/2	+14 5	— 5 2	+ 9	3° 2	3° 70		

[1] Le retard qui résulte ici de la pression sur le repos serait beaucoup plus grand, mais, le recul déterminant une accélération, le retard exprimé n'est que son excès produit par la pression au repos, sur l'avance occasionnée par le recul.

[2] Dans cette expérience, l'accélération résultant du recul a presque totalement compensé la pression exercée sur l'ancre, mais dans l'expérience suivante, avec une lentille plus légère, l'empire du recul a augmenté et donné plus d'accélération.

N'ayant donné dans nos derniers articles que des notions très-restreintes sur la meilleure disposition des Horloges publiques, nous y suppléons ici en partie par l'extrait suivant d'une communication relative aux dessins que nous a fournis M. Jean Wagner, neveu, membre de la Société chronométrique de Paris, où cet artiste a développé maintes fois des applications géométriquement raisonnées : nous en avons déjà signalé quelques-unes dans le cours de ce Traité. On connaît déjà les nombreux travaux de ses ateliers concernant la mécanique en général, ses Horloges de ville et de campagne pour monuments publics, églises, châteaux, usines, manufactures, colléges, pensions, etc.; ses Pendules à poids et à ressorts pour ateliers, vestibules, etc.; ses Pendules et Horloges contrôleurs, pour rondes de nuit; ses réveils, lampes de phares, paratonnerres garnis en platine, cordes conductrices en métal, métronomes pour musique, etc., etc. Et l'on sait que cet établissement se charge de fendre et arrondir au burin les dentures et de diviser les plates-formes de grande et moyenne dimension, etc. C'est donc des observations d'un artiste exercé dans ces divers genres que nous extrayons ce qui suit :

« Permettez, monsieur, que sans m'appesantir sur des détails si bien connus de vous « et de tous les vrais artistes, je me borne ici à spécifier certaines conditions essentielles « que je m'attache à remplir dans les instruments exécutés dans mon établissement. « Ces conditions sont souvent contrariées par la disposition des emplacements; mais « quelle que soit, par exemple, l'étendue de parcours permis aux poids moteurs d'une « Horloge, les révolutions y doivent être combinées pour un temps de marche déter« miné à l'avance, en profitant de tout l'espace disponible pour la descente des poids, « afin d'en réduire les pesanteurs, et par suite l'usure de la machine... Pour réduire les « frottements, il faut disposer les mouvements en raison de l'éloignement, du nombre et « diamètre des cadrans, du poids des aiguilles; et même, lorsque la transmission du « mouvement à celles-ci dépasse une certaine étendue, il convient souvent d'y employer « un remontoir d'égalité... Je ne vous parlerai pas ici des détails d'exécution tels que les « rapports exacts entre les diamètres primitifs des roues et des pignons (que vous avez si « clairement expliqués dans votre ouvrage), de la forme des dentures, des effets simples « et directs des détentes, des bras d'arrêt en tangente pour éviter les ressauts, de la faci« lité des dégagements, etc., qui doivent naturellement être déterminés avec soin, mais « de la nécessité d'une disposition générale des Horloges, qui permette de les placer dans « toute localité et de rendre leur service et entretien facile et commode... Vous verrez, « par ces dessins que j'ai l'honneur de vous transmettre, que leur disposition, résultat « d'une longue expérience, satisfait aisément à toute variation de placement. Les cylin« dres et le tirage des marteaux sont dégagés de manière à pouvoir être dirigés en divers « sens... Le départ en *a*, *b* de la tringle qui transmet le mouvement aux aiguilles du « cadran ou des cadrans peut se projeter dans toutes les directions au moyen d'engrena« ges d'angle; la mise à l'heure de ces aiguilles est accusée par le petit cadran intérieur « du haut de l'Horloge... Le *mouvement* étant groupé séparément des rouages de son« nerie, chaque partie se démonte à part, en levant les coqs qui tiennent les axes en « cage... On peut y faire sonner les quarts simples ou doubles au besoin. On peut aussi

« en retrancher les quarts de la gauche, suivant la ligne A B, et les remplacer par une « sonnerie en volée pour la sortie et la rentrée dans une usine, comme je l'ai pratiqué « dans nombre de fabriques... Le *mouvement*, placé dans son coq particulier, peut « être simple, ou avec l'un de mes remontoirs d'égalité, de dispositions diverses, éprou- « vés maintes fois avec succès... On peut y adapter, soit un pendule simple, soit un pen- « dule compensé par un levier placé dans le coq du *mouvement;* le pendule est dans « l'intérieur du châssis, ou support général (fort bâtis en bois), pour y être garanti de « tout choc pendant que l'on remonte... Les mêmes bases de construction permettent « une Horloge remontée tous les jours ou tous les huit jours, en changeant les nombres « et révolutions, et en raison du plus ou moins de parcours des poids, etc., etc. »

Nombre des rouages d'une Horloge simple.	1re roue, 80 pignon, 10 2e roue, 75 pignon, 10 R. d'éch., 30 P., 2 sec.	Pour les deux sonneries. .	1re roue, 80 pignon, 10 2e roue, 80 pignon, 10 Chapp., 90 pignon, 8

NOTA. Si l'on employait au dernier engrenage de sonnerie un pignon de 9, comme il a été dit ailleurs, alors, la roue qui le mènerait serait nombrée à proportion.

A l'égard du remontoir et pour ceux qui ne le connaissent pas, il peut être utile d'ajouter que dans celui dont il s'agit ici, la seule force motrice appliquée à la roue d'échappement est celle d'un léger poids fixé par une petite vis sur le levier horizontal du calibre fig. 3, tandis que le volant du rouage de mouvement est suspendu momentanément par une détente attenant audit levier; que, pendant un nombre voulu de secondes, le levier descend en agissant sur l'échappement, et arrive peu à peu à dégager le volant, ce qui permet à chaque fois au rouage de remonter le levier et son petit poids, au moyen d'un des engrenages d'angle; tandis que l'autre engrenage d'angle, servant de point d'appui, fait toujours agir le levier sur l'échappement. Cette sorte de mécanisme varié de tant de manières est assez connu de ceux qui s'attachent à en employer un, et ils savent qu'il exige d'autant plus de soin dans son exécution et ses effets, que les négligences y seraient beaucoup plus sensibles sur la partie si délicate de l'échappement, où il agit plus directement, que dans le cours du rouage; et qu'enfin un rouage simple et soigné, employé seul, serait préférable à tout remontoir quelconque négligé ou mal entendu, d'où il résulte, comme il a été dit ailleurs, que ce mécanisme ne doit être employé que par des artistes exercés dans ce genre, et en état d'en bien analyser les effets.

Extraits d'observations inédites sur le pendule à mercure, comparé dans quelques cas avec celui à gril, et communiquées par M. Kessels d'Altona, auteur de la dernière Pendule astronomique décrite récemment, paragraphe 1612.

« Le pendule à mercure est presque le seul en usage en Angleterre depuis le commen- « cement de ce siècle; il offre en effet bien des avantages, comme simplicité de construc-

« tion, et réunissant presque tout son poids au *centre d'oscillation* ou de *percussion;* la « hauteur de la colonne de mercure, plus homogène et plus mobile, y peut être trouvée « par le calcul, et même être aisément tâtonnée par la simple pratique. Ce pendule « muni d'un flotteur est aussi sûr dans ses effets qu'un thermomètre; le pendule à mer- « cure étant placé dans une salle d'observatoire où la température des couches d'air du « haut et du bas ne diffère pas sensiblement, le mercure servant de lentille corrige aussi « parfaitement que possible la dilatation générale. Mais il n'en est pas de même dans une « chambre habitée et chauffée, où l'air le plus chaud et le plus léger se porte dans les « couches supérieures, et produit ce même effet dans la caisse même de l'Horloge astro- « nomique; car j'ai observé, dans ce cas, qu'un thermomètre placé dans la caisse de « l'Horloge astronomique à la hauteur de la suspension est loin de rester d'accord avec « celui de même espèce placé à la hauteur de la lentille, laquelle doit produire seule la « compensation absolue. J'ai trouvé alors que le thermomètre placé à la hauteur de la « lentille restait plus bas d'environ 3 à 4°, et que la lentille ne pouvait pas corriger suf- « fisamment les différences de la verge et les effets généraux des parties supérieures; ce « qui n'a pas lieu dans une salle vaste d'observatoire qui n'est pas chauffée ni conti- « nuellement habitée. Ayant placé dans mon cabinet, habité et chauffé jusqu'à 18° à « 20° Réaumur, deux thermomètres isolés, aux mêmes hauteurs que dans la caisse de « l'Horloge, j'ai trouvé entre ces thermomètres à peu près la même différence, celle « d'environ 3 à 4°.

« Or cette différence de hauteur et de température n'influe pas de même sur le pen- « dule à gril, parce que le moyen compensateur y étant étendu et fonctionnant sur toute « la hauteur du gril, chaque portion s'y trouve compensée à proportion de son besoin « local. Ainsi il me semble que l'on en doit conclure que si le pendule à mercure con- « vient parfaitement dans un observatoire, il n'en est pas de même dans un appartement « chauffé et habité. »

D'après cette remarque utile d'un artiste bon observateur, il s'ensuivrait que, pour employer le mercure comme compensateur dans un lieu habité et chauffé, il resterait à trouver, soit par une étuve pratiquée au pied de la caisse et contenant des mèches allumées, soit autrement, un moyen sûr de conserver la même température dans toute la hauteur intérieure de la caisse de l'Horloge, moyen déjà pratiqué dans d'autres cas, et qu'on peut espérer d'obtenir avec de suffisantes expériences; et qu'alors ce moyen étant trouvé, il n'en serait pas moins probable qu'alors, même dans un lieu habité et chauffé, la compensation par le mercure serait toujours préférable à celle du gril, sujet par sa nature à trop de frottements et à n'agir souvent que par sauts ou par intervalles irréguliers.

Nota. Nous prenons occasion de l'article ci-dessus de M. Kessels pour rappeler ici des corrections insuffisantes relatives à son Horloge astronomique, insérées déjà en partie comme nota au bas de notre paragraphe 1655, page 509 de ce 2° volume, et nous les répétons ici plus complétement, d'après une nouvelle communication de l'auteur.

Copie d'une notice sur la dilatation de quelques métaux, marbres et pierres, et sur celle d'un alliage composé de huit parties de bismuth, cinq d'étain et trois de plomb, et sur la propriété particulière à cet alliage, de prendre de l'extension pendant plus de trois jours après avoir été fondu : lue à l'Académie royale des sciences, belles-lettres et arts de Rouen, le 25 février 1842; par M. Destigny père, ancien horloger, membre de ladite Académie, et de la Société libre d'émulation de Rouen, etc.

Messieurs,

« Dès l'année 1828, sur l'invitation de feu M. Alavoine, notre savant confrère, qui devait, dans la construction de la flèche de la cathédrale de Rouen, mettre en contact le fer et la pierre, et désirait connaître le rapport de dilatation de ces deux substances, je me livrai à plusieurs expériences, tant sur la pierre de Vernon-sur-Seine, que sur celle de Saint-Leu, et sur trois espèces de marbre, afin de déterminer leur extension par l'élévation de la température. Le résultat de ce travail (le seul, je crois, qui existe encore) fut imprimé dans le précis des travaux de la Société d'émulation. L'année suivante, je fus invité par la Société d'encouragement de Paris, au nom de M. de Chabrol, à faire des expériences analogues sur la pierre de Volvic, produit volcanique dont on se servait alors pour faire des trottoirs, et qui a été employée à Rouen pour celui du cours *Boïeldieu*. C'est le sujet de la première table ci-après.

« Depuis cette époque, et lorsqu'on annonça l'alliage composé de M. Darcet, pour servir à faire des plaques fusibles pour les chaudières à vapeur, je pensai à faire aussi des expériences sur la dilatation. Ce fut alors que je remarquai un phénomène très-extraordinaire. Cet alliage, contrairement à tous les métaux qui (mis en fusion) font retrait en refroidissant, cet alliage, dis-je, prend au contraire de l'accroissement pendant plus de trois jours; d'abord d'une manière sensible pendant trente heures et ensuite pour de très-petites quantités, et cela à une température constante. Je ne fis pas dans le temps usage des notes sur mes expériences; je viens de les renouveler et j'ai l'honneur de vous les soumettre.

« Vous verrez, Messieurs, par la seconde table jointe à cette notice, que mes observations ont été faites d'heure en heure, excepté dans la nuit du dimanche au lundi, pendant laquelle je n'ai observé que trois fois.

« Si l'on remarque quelques anomalies dans la colonne des différences indiquant l'allongement de la verge, cela s'explique par la petite variation dans la température, dont l'effet de dilatation ou de contraction se trouve ainsi tantôt ajouté à celui que je cherchais à constater, et tantôt au contraire retranché, et aussi à cause d'un plus long intervalle dans l'observation.

« En résumé, l'effet total a été de 0 mill. ,175 sur la verge longue de 320 mill. ,5 ; ce qui ferait pour une longueur d'un mètre, 0 mill. ,546021. A cet allongement, il faut ajouter celui qui a eu lieu depuis le moment de la fusion jusqu'à celui où il a été possible d'ajuster la verge sur l'instrument, effet que je n'ai pu apprécier d'une manière bien exacte, mais que je pense avoir été double de celui constaté par l'instrument ; conséquemment l'allongement total serait, sur une longueur d'un mètre, à une température constante, de 1 mill. ,63806 ; ou allongement absolu ,00163806, quantité presque identique à celle produite par la dilatation pour 100° d'élévation de la température.

« Voici, au reste, de quelle manière j'ai apprécié à l'œil cet allongement, à partir du moment de la fusion, jusqu'à celui où j'ai pu placer la verge sur le pyromètre. J'ai fait pratiquer une rainure dans un morceau de bois ; j'ai fermé l'un des bouts et ajusté à frottement à l'autre bout une petite languette, que j'ai eu soin de faire affleurer très-exactement avec l'extrémité de cette espèce de lingotière. Après avoir versé la matière, j'ai remarqué que l'allongement de la verge jusqu'au moment où elle a été assez froide pour être enlevée, avait poussé la petite languette et l'avait fait désaffleurer de la lingotière d'une quantité que j'ai évaluée double de celle indiquée par le pyromètre, lors des expériences.

« Je me suis assuré que ce singulier effet n'est pas inhérent au bismuth, puisque, fondu seul, il fait, comme les autres métaux, retrait en refroidissant ; mais qu'il résulte de son mélange entre l'étain et le plomb. Il semble que les molécules de cet alliage, avant de se cristalliser et de se combiner ensemble, commencent par se combattre, mais heureusement finissent par se mettre d'accord ; mais cet effet extraordinaire cesse.

« Je joins à cette notice la première table dans laquelle je fais figurer la dilatation du bismuth, celle de l'alliage, celle de la pierre de Volvic et aussi celle des diverses substances que j'ai observées en 1828, parce que j'ai pensé que ces anciennes expériences font en quelque sorte corps avec celle dont je viens d'avoir l'honneur de vous entretenir. »

DERNIER AVIS.

Quelques lecteurs qui connaissent notre ancienne et longue liaison avec un artiste très-renommé pourraient croire que ce Traité se ressent des méthodes adoptées par cet artiste : ce serait une erreur ; car, au lieu de l'approuver, nous nous sommes au contraire toujours efforcé de le ramener aux vrais principes dont une imagination peu réglée et le défaut d'instruction générale l'écartaient trop souvent. Il était doué cependant d'une rare sagacité naturelle, mais plutôt dans le sens de séduire et dans l'intérêt d'une réputation assez singulièrement acquise, que dans celui des principes de son art. Lorsque l'instruction ne dirige pas une imagination subtile, elle n'en est que plus exposée à s'égarer, ainsi que plusieurs notes critiques de ce livre le font remarquer. Une pratique ordinaire, suivant de bons modèles, est moins ambitieuse, mais aussi plus modeste et plus sage, elle atteint mieux le but véritable, celui de réunir l'*exactitude*, la *solidité*, la *simplicité* et l'*économie*.

Première table de la dilatation absolue de divers substances, pour une variation de température de 100° centigrades ou 80° Réaumur, par M. Destigny, P.

	DILATATION ABSOLUE.	DILATATION pour UNE LONGUEUR D'UN MÈTRE.
		millim.
Cuivre jaune ou laiton.	0, 00187821	1, 8782
Fer doux forgé.	0, 00122045	1, 2204
Marbre de Carrare.	0, 00084867	0, 8486
Marbre de Saint-Béat.	0, 00041810	0, 5685
Marbre de Solst.	0, 00056849	0, 4181
Pierre de Vernon-sur-Seine.	0, 00043027	0, 4303
Pierre de Saint-Leu.	0, 00064890	0, 6490
Alliage Darcet.	0, 00169688	1, 6968
Bismuth.	0, 00121034	1, 2103
Pierre de Volvic, ou produit volcanique.	0, 00020390	0, 2039

Pesanteur spécifique des trois substances ci-dessous, l'eau étant prise pour unité.

Produit volcanique.	2, 3286
Pierre ponce.	0, 8815
Pieux en Chêne, ayant servi de pilotis à l'ancien pont de Rouen.	0, 6486

Deuxième table. Expériences faites le 13 février 1842, pour constater l'extension que prend, en refroidissant, un alliage composé de 8 parties de bismuth, 5 d'étain et 3 de plomb, après avoir été mis en fusion et placé le plus tôt possible sur le pyromètre.

THERM. centigrade.		DIVISIONS DU PYROM. h.min. marquées par l'aiguille[1].		DIFFÉRENCE.
		Point de départ.		
11° ,1	Dimanche.	10 30	35	
		11 30	64	29
		0 30	85	21
		1 30	101	16
		2 30	112	11
		3 30	120	8
		4 30	127 ,5	7 ,5
		5 30	133	
		6 30	138	5
		7 30	142	4
		8 30	146	4
11° ,5		9 30	150	4
		10 30	152 ,5	2 ,5
		11 30	155	2 ,5
	Lundi.	0 30	157	2
		4	164	7

THERM. centigrade.		DIVISIONS DU PYROM. h.min. marquées par l'aiguille[1].		DIFFÉRENCE.
11° ,5	Lundi.	6 30	167	3
		9	170	3
		10 30	172 5	2 5
		11 30	175	2 5
		0 30	177	2
		1 30	180	3
		2 30	182 5	2 5
		3 30	186 5	4
		4 30	192	5 5
		5 30	192	0
		6 30	192	0
		7 30	192 25	0 25
		8 30	192	0 25
		9 30	192	0
Mercredi 9 30 du soir, conséquemment. pendant 48 heures.			210	18

[1] Chaque degré parcouru par l'aiguille répond à un millième de millimètre.

Parvenus à la fin de cet ouvrage, nous en sentons à regret les légères imperfections occasionnées par le long espace de temps qui s'est écoulé du commencement à la fin de la publication, ce qui ne nous a pas permis de lui donner l'ensemble et la régularité que nous aurions désiré. On en sera dédommagé par nombre d'articles nouveaux et utiles que le lecteur attentif saura découvrir et méditer, quoique tous ne soient pas cités dans les tables, mais souvent dans les notes, dont plusieurs sont en peu de mots l'histoire des hommes et des choses. Elles sont importantes et la plupart dans l'intérêt du sujet. On verra que cet ouvrage n'est point une de ces *spéculations* si communes aujourd'hui. Cette édition n'est *illustrée* que par les soins de son exécution, sauf les dernières feuilles terminées au milieu de troubles politiques, mais qui n'en ont point altéré le sens. Elle nous a occasionné du reste plus de frais imprévus que sa publication n'en pourra couvrir, à moins d'une 2e édition que ne nous permet pas d'espérer notre âge avancé dont 60 ans ont été consacrés à la pratique et à la théorie de l'art que nous avons essayé de ramener à ses vrais principes. — Nous profitons d'une dernière page restante pour signaler encore ici comme exemple un faux problème de mécanique générale qui a souvent séduit une foule de bons esprits et qui, faute d'une analyse complète, pourrait encore en égarer plusieurs autres.

Du MOUVEMENT *dit* PERPÉTUEL.

Pour bien s'entendre dans toute question, il faut d'abord en définir clairement les termes et les conditions. On entend par *mouvement perpétuel*, celui qui pourrait se conserver ou se renouveler continuellement par lui-même sans le secours d'aucune cause extérieure, ce qui en exclut, comme cause, l'action des éléments, du magnétisme, de l'électricité, etc., et tout ce qui ne résulte pas d'une composition purement mécanique; autrement le mouvement perpétuel serait tout trouvé, soit dans l'écoulement naturel des eaux qui ne tarissent pas, soit dans d'autres effets de la nature considérée comme éternelle. Il ne s'agit donc ici que des effets mécaniques de la pesanteur, de l'inertie, de l'élasticité, de la chute des corps, enfin des propriétés de la matière dont l'action serait proprement mécanique.

1° Toute machine ne peut naturellement développer une force supérieure à celle qu'elle reçoit de son premier moteur, car elle ne peut donner ce qu'elle n'a pas. Elle n'atteindrait même l'égalité entre la force reçue et celle produite, que par la suppression de tout frottement et de la résistance de l'air; or, ces deux obstacles y sont inévitables.

2° On peut réduire toute machine à ses simples éléments, c'est-à-dire aux principes et effets du levier, en y considérant ceux de l'équilibre qui permet momentanément les balancements ou oscillations d'un levier sur son point d'appui, au moyen de puissances égales placées à ses extrémités semblablement éloignées du centre de mouvement, ou bien inégales, mais alors inversement proportionnelles chacune à la longueur de son bras de levier, comme dans la balance romaine, où la quantité de mouvement de deux poids inégaux produit la même puissance; car toute puissance est le produit d'une 1re force quelconque multipliée par sa vitesse, c'est-à-dire par sa quantité de mouvement, ou par sa *tendance à se mouvoir* avec cette quantité. Un 1er poids de 25 livres ne tient en équilibre un autre poids de 100 livres, qu'au moyen du bras du 1er 4 fois plus long, et se mouvant ou *tendant à se mouvoir* 4 fois plus vite que le bras chargé de 100 livres; alors, ce que les 25 livres ont de moins en 1re force propre, elles le regagnent en vitesse ou en temps, ou en espace parcouru, *et vice versâ.* La puissance de chaque poids, multipliée par sa vitesse ou sa tendance à la prendre pour entrer en action, forme dans ce cas un produit égal, ainsi que des résistances égales et mutuelles, et il n'y a pas de mou-

vement. Il reste au contraire un obstacle par le frottement du point d'appui, si réduit qu'il soit, et de plus la résistance de l'air. Si l'on se permet alors d'établir des oscillations par une cause étrangère à l'appareil, elles seront bientôt réduites au repos, comme il arrive avec le pendule libre. Or, l'on sait que les effets de toute machine se réduisent en définitive à l'action d'un ou plusieurs leviers, et ne s'estiment que par là. En effet, le mouvement étranger ajouté ici à l'un des bras du levier pour le faire osciller, ne pouvant lui-même se conserver, à plus forte raison le mouvement d'une machine plus compliquée que l'on voudrait tirer d'elle-même, ne pourra continuer, d'où il résulte que le ***Mouvement perpétuel*** est IMPOSSIBLE. La réduction précédente à un ou plusieurs leviers s'applique rigoureusement à toute machine quelconque.

Ce qui doit consoler plusieurs bons esprits séduits par le problème insoluble du prétendu *mouvement perpétuel*, c'est qu'il a exercé vainement les mathématiciens pendant environ 2,000 ans. Depuis longtemps, l'Académie des sciences, convaincue de cette impossibilité démontrée, n'admet plus l'examen des prétentions au succès, même en accordant la destruction de l'appareil par le temps et l'usage, et encore un 1er mouvement étranger communiqué qui ne peut également manquer de se réduire à zéro; *ici le mouvement, bien que lent à s'éteindre, doit finir par son principe même.*

Il en est de même de la *Quadrature du cercle* (pron. couadr.), de l'*Astrologie judiciaire*, de la *Pierre philosophale*, de la *Baguette divinatoire* (simple jonglerie), des *Oracles*, *Prédictions*, etc. « L'étude et la vraie philosophie rendent l'homme le plus sage « des animaux; mais la divination et l'astrologie en avaient fait le plus fou, comme la « superstition, le despotisme, l'ambition, et tout fanatisme en ont trop souvent fait le « plus malheureux! » (*Diog. La.*)

Les compositions mécaniques de l'Horlogerie, surtout celles établies par des moyens nouveaux, inusités, ont besoin d'une longue expérience, même après avoir été analysées, comme dans l'article ci-dessus. Les compositions anciennes, corrigées, régénérées, et réduites à une *prudente* simplicité, en ont encore besoin de nouveau, et sont alors les plus sûres. Si nous en avons décrit quelques-unes, un peu compliquées, c'est en faveur de ceux qui en auraient à rétablir; mais nous avons évité les autres comme mauvais exemple. Rien de plus sûr dans son emploi, de plus simple, qui ait moins de frottement et soit plus près de la constance, que des rouages *exacts dans leurs proportions*, car par eux-mêmes, avec une force motrice bien établie en un bon échappement, ils rendraient les oscillations du régulateur presque *isochrones*, sauf les influences de la température et celles hygrométriques. Les compositions que nous pourrions dire *machinées*, même les Cadratures ordinaires de répétition, comportent des frottements, *grippements* et adhérences beaucoup plus variables, et peuvent faire arrêter le meilleur *mouvement*. Cependant, avec des soins et de bonnes dispositions, celles-ci peuvent être admises, mais ces qualités sont rares. Quant aux agréments extérieurs ou intérieurs, aux nouveautés subtiles, et autres futilités, elles ne séduisent que les esprits faux et ignorants qui s'y adonnent, et ceux qui les admirent; tandis que l'artiste véritable et instruit n'admet que le vrai, le simple, le solide et l'utile.

FIN DE CE TRAITÉ D'HORLOGERIE.

TABLE

DES CHAPITRES ET DES MATIÈRES DU TOME DEUXIÈME

CHAPITRE PREMIER.

CHAPITRE II

CHAPITRE III

CHAPITRE IV

CHAPITRE V

CHAPITRE VI

HAPITRE VII

CHAPITRE VIII

CHAPITRE IX

CHAPITRE X

FIN DE LA TABLE DU DEUXIÈME VOLUME

AVIS AU RELIEUR

TOME PREMIER. Le frontispice n° 1, en tête et en regard du titre, puis les feuilles 1 à 29, ensuite les planches 1 à 18.

TOME DEUXIÈME. Le frontispice n° 2, en tête et en regard du titre, puis les feuilles 1 à 36, ensuite les planches 19 à 51.

TABLE GÉNÉRALE DES MATIÈRES

PAR ORDRE ALPHABÉTIQUE.

Les chiffres romains I et II marquent les tomes premier et second; les chiffres qui suivent indiquent les pages.

A

B

D

E

M

N

O

Q

R

FIN DE LA TABLE GÉNÉRALE DES MATIÈRES.

PARIS. — IMPRIMERIE NOUVELLE (ASSOCIATION OUVRIÈRE), 14, RUE DES JEUNEURS
G. MASQUIN ET Ce.

APPENDICE

CHAPITRE I.

DES ÉCHAPPEMENTS.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.

De tous les organes qui entrent dans la composition d'une pièce d'horlogerie, l'échappement est celui dont les fonctions présentent, sans contredit, le plus d'importance, et l'on peut dire que la bonne marche d'une horloge ou d'une montre dépend, dans une très-grande mesure, de la disposition plus ou moins rationnelle de cet organe et de son exécution plus ou moins parfaite.

Aussi, depuis longtemps, l'attention des savants et des artistes s'est-elle portée de préférence sur cette question, et l'on a vu apparaître successivement une série de dispositifs, dont chacun, dans l'opinion de son auteur, constituait la solution définitive du problème; toutefois, le nombre de ceux qui sont passés dans la pratique est relativement très-restreint; les autres, suivant la remarque de Moinet, sont plutôt des exemples de ce qu'il faut éviter que des modèles à suivre.

Les défectuosités de certains échappements, malgré le talent et l'habileté de leurs inventeurs, doivent être attribuées à des causes multiples. La pratique seule, le génie même de l'invention sont, en effet, insuffisants pour conduire à une solution satisfaisante d'un problème aussi complexe, et il est indispensable d'y joindre une connaissance approfondie des lois générales de la mécanique. L'ignorance ou l'oubli de ces lois a été la principale cause de l'insuccès des productions d'un grand nombre d'habiles praticiens.

Mais ce serait une erreur non moins grave, dans ce genre de questions, de vouloir se guider uniquement d'après des considérations mécaniques. La théorie, en pareil cas, ne peut donner de résultats sérieux qu'à la condition de s'éclairer constamment par les données de l'expérience.

C'est là, du reste, l'idée à laquelle paraissent avoir obéi les quelques auteurs qui, dans ces dernières années, ont cherché à déduire, des lois mécaniques et de l'observation, les principes généraux destinés à guider les horlogers dans l'exécution des divers échappements. Nous allons essayer de résumer ces principes, en nous bornant, pour les échappements déjà décrits dans le *Traité* de Moinet, aux développements rigoureusement indispensables à l'intelligence des nouvelles considérations théoriques.

Fonctions de l'échappement. — Dans les pièces d'horlogerie, l'échappement a essentiellement pour effet :

1° D'empêcher le corps de rouages, ou plus simplement le rouage, de prendre, sous l'action de la force motrice, un mouvement accéléré, qui ne tarderait pas à s'annuler, en même temps que l'intensité de cette force ;

2° De produire, dans ce rouage, des déplacements successifs, intermittents, de même durée et également espacés ;

3° D'exercer sur le régulateur (pendule ou balancier) une action susceptible d'entretenir son mouvement d'oscillation, c'est-à-dire de lui restituer la quantité de mouvement qu'il perd, à chaque oscillation, par les frottements et la résistance de l'air.

Classification des échappements. — On divise ordinairement les échappements en quatre classes principales, qui donnent lieu elles-mêmes à plusieurs subdivisions. Nous conserverons cette classification, bien qu'elle soit assez peu rationnelle et qu'elle soit sans utilité bien réelle pour l'étude que nous en avons en vue.

La première classe comprend les *échappements à recul*, c'est-à-dire ceux dans lesquels la roue d'échappement, à une certaine période de son action, prend un mouvement de recul plus ou moins prononcé ; cet effet est très-sensible dans l'échappement dit à roue de rencontre et dans quelques ancres de pendules.

La deuxième classe est celle des *échappements à repos*, ainsi nommés de ce que la roue, après avoir transmis son impulsion, reste immobile, la pointe de la dent en prise s'appuyant, soit contre l'axe du balancier, soit contre une pièce concentrique à cet axe et qui lui est invariablement reliée. A cette classe appartiennent les échappements à cylindre de Duplex, dans les montres, ceux de Graham, et à chevilles dans les pendules, etc.

La troisième classe, dite des *échappements libres*, comprend tous ceux qui sont soustraits à l'action continue de la force motrice. Dans ces échappements, en dehors de la faible période correspondant à l'impulsion, le balancier effectue son oscillation dans une complète indépendance de la roue. Le repos de la dent en prise n'a plus lieu sur le balancier, ou sur une pièce concentrique, mais sur une pièce intermédiaire, complétement

isolée. Dans cette classe rentrent les nombreuses variétés de l'échappement à détente des chronomètres, l'échappement à ancre des montres, etc.

La quatrième classe est celle des *échappements libres à force constante*, qui diffèrent des échappements libres en ce que l'impulsion est indépendante du rouage et produite par une force toujours la même, comme, par exemple, celle d'un poids tombant constamment d'une même hauteur.

La classification précédente, bien que consacrée par l'usage, n'a cependant rien d'absolu. Ainsi, dans certains échappements qui font partie de la seconde classe, comme l'échappement Duplex, par exemple, la roue prend, à un certain moment, un mouvement en avant, pour reculer ensuite de la même quantité. D'autres échappements sont à repos d'un côté et à recul de l'autre; il est donc difficile de les faire rentrer dans une seule classe.

Avantages et inconvénients des divers échappements. — Les échappements à recul sont très-anciens et ne sont plus guère employés aujourd'hui que dans l'horlogerie commune. Ils offrent l'avantage d'être d'une exécution facile et peu dispendieuse; ils n'exigent pas d'huile et fournissent, par suite, une marche assez prolongée, sans exiger de nettoyages, comme les échappements pour lesquels l'huile est indispensable.

Par contre, ils exercent une action assez défavorable sur la régularité des oscillations du pendule, surtout lorsque le recul est prononcé; dans ce cas, ils se prêtent mal à corriger l'influence des variations de la force motrice et l'augmentation de frottement des rouages, qui tend naturellement à se produire par la dessiccation ou l'épaississement de l'huile.

Les échappements à repos permettent, au contraire, de corriger, dans une certaine mesure, les inégalités de la force motrice et celles qui résultent des frottements des rouages. On comprend, dès lors, qu'ils doivent donner, en général, une régularité de marche supérieure à celle des échappements à recul. Ils ont, par contre, l'inconvénient d'exiger de l'huile aux surfaces frottantes et d'être exposés, par suite, à des nettoyages beaucoup plus fréquents.

Avec les échappements libres, qu'on emploie dans les chronomètres, on obtient une plus grande précision qu'avec les échappements à repos frottant. Leur supériorité, à ce point de vue, tient principalement à ce que le régulateur, après avoir reçu l'impulsion, achève son oscillation dans une indépendance complète de la force motrice et ne se trouve pas soumis, par conséquent, pendant la plus grande partie de son parcours, à l'influence de la pression et des frottements des repos de la roue d'échappement. Il n'est pas inutile, d'ailleurs, de faire remarquer que cette supériorité des échappements libres dépend essentiellement de la valeur des organes de régularisation; elle est naturellement d'autant plus

prononcée que la compensation par le balancier et l'isochronisme par le spiral sont plus parfaits.

Les échappements libres à force constante sont ceux qui, en principe, assurent la plus grande régularité de marche et qui, pour ce motif, semblent devoir être employés de préférence à tous les autres. Avec un échappement de ce genre, non-seulement le régulateur peut exécuter librement ses oscillations, pendant la plus grande partie de leur étendue, mais encore les impulsions qu'il reçoit ont une énergie constante, de telle sorte que les variations dans la force motrice et dans les frottements des rouages n'exercent pas la plus légère influence sur les oscillations de ce régulateur.

Malgré ces avantages incontestables, les échappements libres à force constante ne sont guère applicables qu'aux horloges monumentales et ne trouvent, pour ainsi dire, pas d'emploi dans les machines horaires de faibles dimensions. Ce résultat tient principalement à ce que l'exécution de ces échappements ne peut être confiée qu'à des ouvriers d'une intelligence et d'une habileté exceptionnelles. La capacité nécessaire pour exécuter les échappements compliqués, dans des conditions de perfection telles qu'on puisse compter, en toute sécurité, sur un résultat satisfaisant, suppose forcément la réunion de connaissances théoriques assez étendues et d'une expérience pratique consommée.

Or, si l'on trouve aujourd'hui beaucoup d'horlogers d'une habileté de main extrêmement remarquable, ceux qui possèdent, en même temps, des connaissances suffisantes sont malheureusement beaucoup plus rares. C'est, en grande partie, à cette dernière cause qu'il convient d'attribuer le petit nombre d'applications qu'on a faites jusqu'ici des échappements libres à force constante. Toutefois, nous devons constater que, dans ces dernières années, quelques savants artistes ont essayé de réagir contre cet abandon systématique et ont donné naissance à de nouveaux types, qui, en raison de leur simplicité relative, méritent d'appeler l'attention des horlogers.

Nous donnerons plus loin la description détaillée de ceux de ces appareils qui ont déjà reçu la sanction d'une expérience de quelques années. Mais, avant, il nous paraît utile d'indiquer les principes généraux qui doivent guider les artistes dans la construction des échappements simples, d'autant plus que tous ces principes sont également applicables aux échappements composés.

ÉCHAPPEMENTS SIMPLES.

Sous le nom d'*échappements simples*, nous comprendrons, suivant l'usage, les échappements à un seul axe, qui communiquent directement leur mouvement au régulateur.

Le nombre des échappements de ce genre, en usage aujourd'hui, est relativement très-restreint. Leurs dispositions et leurs modes de fonctionnement ont été décrits dans le *Traité* de Moinet, avec assez de détails pour qu'il soit inutile, en général, d'y rien ajouter; mais il n'en est pas de même des règles indiquées pour l'exécution des différents éléments dont ils se composent. Ces règles, en effet, sont toutes purement empiriques, tandis que, grâce aux travaux de praticiens éminents, il est devenu aujourd'hui possible d'établir un certain nombre de principes généraux, qui doivent servir de guides pour l'exécution des différentes pièces et que nous allons essayer d'indiquer successivement sur quelques types convenablement choisis.

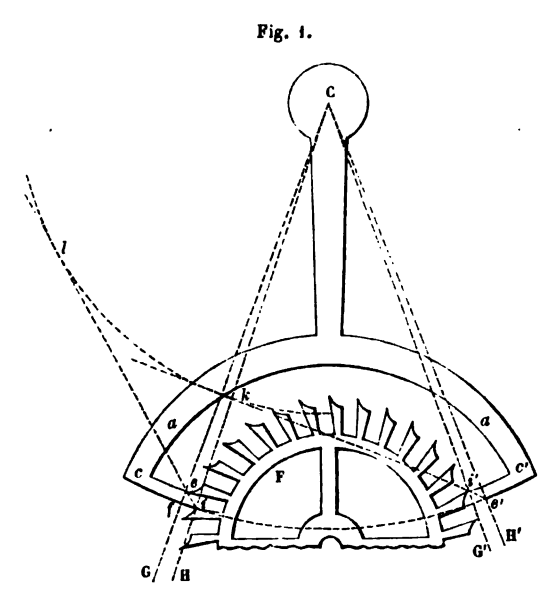
ÉCHAPPEMENT A ANCRE DE GRAHAM.

Cet échappement, qui s'emploie principalement pour les régulateurs de précision et les horloges astronomiques, est représenté *fig.* 1.

Dans cette figure, les dents de la roue sont amincies à leur extrémité et inclinées, de telle sorte que le bout seul de chaque dent soit en contact avec les becs ou palettes de l'échappement.

Les becs, dont l'épaisseur, sauf le jeu, doit être égale à la moitié de l'intervalle d'une dent à l'autre, sont formés par deux parties cylindriques *c*, *c'*, concentriques à l'axe de rotation C de l'ancre et limitées par deux plans inclinés *ei*, *e'i'*, contre lesquels viennent s'appuyer successivement les extrémités des dents de la roue F, pour donner l'impulsion dans un sens ou dans l'autre.

Fig. 1.



La *levée*, c'est-à-dire l'espace angulaire décrit par l'échappement, pendant la durée du contact d'une dent avec le plan incliné, est déterminée par l'obliquité de ce plan. Si nous désignons par α cet angle, qui, sur la figure, est représenté par GCH, par β l'angle du plan incliné (*fei*), par *e* l'épaisseur du bec et enfin par L la longueur C*i*, il est facile d'établir une relation géométrique entre ces divers éléments. En effet, dans le cercle

décrit du point C, comme centre, avec $Ci = L$ pour rayon, les angles étant proportionnels aux arcs, on a :

$$\frac{\alpha}{360} = \frac{if}{2\pi L}. \qquad (1)$$

D'un autre côté, dans le petit triangle rectangle *fei*, un des côtés de l'angle droit est égal à l'autre multiplié par la tangente de l'angle opposé au premier côté, c'est-à-dire qu'on a : $if = e.\ \text{tang}\,\beta$.

En substituant cette valeur de *if*, la première relation devient :

$$\frac{\alpha}{360} = \frac{e.\,\text{tang}\,\beta}{2\pi L}. \qquad (2)$$

Cette relation, qui existe entre quatre éléments α, β, e et L, permet de déterminer l'un quelconque d'entre eux, lorsque les trois autres sont fixés. Ainsi, par exemple, si l'on se donne la longueur du bras L, l'épaisseur du bec et la valeur de la levée qu'on veut produire, on devra prendre, pour l'angle β du plan incliné, la valeur fournie par la formule :

$$\text{tang}\,\beta = \frac{\alpha.\,2\pi L}{e.\,360}.$$

Après avoir calculé la fraction représentée par le second membre, dont tous les termes sont connus, on n'aura qu'à chercher, dans les tables trigonométriques, l'angle qui correspond à la valeur de la tangente.

Ce calcul ne présente, comme on le voit, aucune difficulté. Toutefois, on peut le remplacer par un tracé, qui est à la portée de tous les horlogers, même de ceux qui ne possèdent que de faibles notions de géométrie. Nous laisserons donc de côté, pour le moment, la relation (2), en nous réservant de l'utiliser plus tard, pour la discussion des conditions à remplir dans l'établissement d'un échappement-type.

Tracé de l'échappement de Graham (*fig.* 1, Pl. I). — Le diamètre de la roue d'échappement et le nombre total des dents de cette roue sont variables à volonté et se déterminent par des considérations dans lesquelles nous n'avons pas à entrer pour l'instant. Nous supposerons donc ces deux éléments fixés et nous admettrons le cas le plus ordinaire, celui d'une roue de trente dents. L'axe de cette roue porte alors une aiguille des secondes, qui donne soixante coups par minute ; avec une roue de soixante dents, on emploierait un balancier battant la demi-seconde.

Supposons également fixés la longueur des bras de l'ancre et, par suite, le nombre des dents embrassées entre les deux becs. L'arc sous-tendu par l'ancre doit toujours correspondre à un nombre entier de dents,

augmenté de la moitié de l'intervalle compris entre deux pointes. Sur la figure, la roue a trente dents et l'ancre en embrasse onze, plus une demi-division. La circonférence entière ayant 360°, il en résulte que la distance entre deux pointes est de $\frac{360°}{30} = 12°$ et que, par conséquent, l'arc embrassé est égal à $12 \times 11 + \frac{12}{2} = 138°$. Cet arc correspond aux points d'intersection de la circonférence de la roue avec un cercle passant par le milieu de l'épaisseur des becs et décrit du centre M de rotation de l'ancre. Ce dernier centre n'est pas connu, mais on peut déterminer facilement les deux points d'intersection dont il s'agit, sans tracer le cercle, en remarquant que les tangentes en ces points à ce cercle doivent passer par le centre de la roue. Il suffit donc de mener, par ce dernier centre, deux rayons faisant chacun avec la verticale un angle de $\frac{138°}{2} = 69°$; cet angle peut être pris au moyen d'un rapporteur.

Cela fait, pour déterminer le centre de rotation de l'ancre, on mène, par les points d'intersection, deux tangentes à la circonférence de la roue. Le point de rencontre M de ces deux lignes est le centre d'oscillation cherché. Cette construction donne ce qu'on appelle un échappement tangent; nous verrons un peu plus loin l'importance de cette question de la tangence dans les échappements.

Il reste maintenant à déterminer l'épaisseur des becs ou palettes. En principe, cette épaisseur devrait être prise égale au demi-intervalle entre deux pointes de dents, c'est-à-dire correspondre à un arc de 6° sur la circonférence de la roue; mais, comme la pointe des dents doit conserver, en réalité, une certaine épaisseur et que, de plus, il convient de laisser un certain jeu pour la chute, l'épaisseur pratique ne doit guère être que les $\frac{7}{10}$ ou les $\frac{8}{10}$ au plus de l'épaisseur théorique, c'est-à-dire $4°\frac{2}{10}$ ou $4°\frac{8}{10}$.

Avec cette dernière valeur de $4°\frac{8}{10}$, pour tracer les palettes, il suffira de prendre, sur la circonférence, deux arcs de $2°\frac{4}{10}$, au-dessus et au-dessous des points de tangence, puis de décrire, par les points de division, ainsi obtenus, et du point M comme centre, deux arcs de cercle, qui détermineront les deux faces des becs.

Quant aux plans inclinés, qui doivent terminer ces becs, ils dépendent de la levée et peuvent se tracer facilement, lorsque cette dernière est donnée.

Supposons, par exemple, que cette levée doive être de 1° (valeur admise ordinairement pour les régulateurs d'observation), et que l'angle de repos soit de 1/2°. Par le point M, on mène, pour la palette de gauche, les lignes M*r* et M*g*, faisant avec la tangente M*b* des angles respectivement égaux à 1/2° et 1° 1/2 et, de même, pour la palette de droite, les lignes M*r*

et M*g* formant les mêmes angles, mais en dehors de M*b*, par rapport au centre de la roue. Si maintenant on joint, par la ligne *h*, les points d'intersection de M*r* et M*g* respectivement avec les cercles extérieur et intérieur du bec, cette ligne formera le plan incliné, ou le ***fuyant***, de la palette de gauche, correspondant à la levée de 1°. Le fuyant de la palette de droite se déterminera de la même manière.

Pendant la durée du contact de chaque dent avec la surface extérieure de la palette, c'est-à-dire pendant que l'ancre décrit l'arc de repos, la roue F n'a aucun mouvement; c'est à cette circonstance que l'échappement dont il s'agit doit son nom d'*échappement à repos*.

Les faces de devant des dents reçoivent une certaine inclinaison, qui, d'une manière générale, doit être assez forte pour éviter les effets de collement. Elle varie, suivant la valeur de la levée, entre 6° et 12°; elle doit être de 10° environ pour la levée de 1°, que nous avons admise dans notre tracé.

Quant à la face rectiligne d'arrière de la dent, son inclinaison doit simplement satisfaire à la condition que cette face ne puisse pas être touchée par l'angle de la palette; il en est de même de la partie concave de cette dent.

Remarque.— Si dans la *fig.* 1 du texte. on faisait tourner les lignes CH', CG' autour du point C, jusqu'à ce qu'elles vinssent coïncider avec les lignes CH et CG, il est évident que les lignes *ei* et *e'i'* coïncideraient aussi. Si donc on avait tracé du point C un cercle tangent à la première, la seconde prolongée eût été tangente au même cercle.

Cette observation fournit le moyen de faire toujours des fuyants semblables dans un même échappement ou des échappements différents, en s'assurant, à l'aide d'un disque, si les deux fuyants passent à la même distance du centre de l'échappement et si, par suite, les moments des actions exercées par la roue sur les deux becs sont bien égaux. Du reste, cette égalité absolue n'est pas d'une extrême importance; l'essentiel, au point de vue de la régularité, c'est que la somme des impulsions des deux becs soit bien constante.

Observations sur l'échappement à ancre et à repos de Graham. — De ce qui précède il résulte que les parties essentielles de cet échappement, sont:

1° La hauteur des becs, qui est déterminée par l'écartement des dents de la roue;

2° La levée, fixée par l'angle d'oscillation qu'on veut produire, pendant la période d'impulsion;

3° L'arc de repos, qui maintient la roue immobile, pendant la durée des arcs additionnels, qui suivent ou précèdent ceux d'impulsion.

En dehors de ces trois éléments principaux, toutes les autres formes sont arbitraires et peuvent varier à l'infini. C'est ce qui explique le grand nombre de dispositions différentes adoptées par les divers horlogers. Dans certaines pièces, la fourchette affecte la forme d'un compas ouvert, terminé par deux palettes, semblables à celles que nous venons de décrire. Dans d'autres, les plans inclinés, au lieu d'être placés sur les becs de l'ancre, se trouvent sur les dents de la roue. La construction géométrique est, d'ailleurs, analogue à la précédente et repose sur les mêmes principes. Nous devons signaler, toutefois, un inconvénient assez grave de cette disposition, et qui consiste en ce que les extrémités des becs sont exposées à une usure rapide, par suite de leur contact répété avec les dents de la roue.

Le plus souvent on fait porter les plans inclinés, par moitié, sur les dents et sur les palettes ; ce qui offre le grand avantage de donner plus de force aux bouts des dents et de permettre à l'huile de se maintenir plus facilement qu'avec les dents aiguës.

L'échappement à ancre, proprement dit, qui est généralement employé dans les pendules, ne diffère de l'échappement de Graham, dont nous venons de nous occuper plus spécialement, qu'en ce que son centre d'oscillation est beaucoup plus rapproché du centre de la roue. On l'exécute à repos ou à recul ; quelquefois même il est à demi-repos, c'est-à-dire que l'un des becs est à repos et l'autre à recul. Les détails, fournis dans le corps de l'ouvrage de Moinet sur ces différents types d'échappements, joints à ceux que nous venons de donner pour celui de Graham, nous paraissent suffisants pour permettre de résoudre toutes les questions que peut soulever l'établissement rationnel de ces organes.

Le seul point que nous ayons laissé complétement de côté est relatif à la détermination de la longueur des bras.

Pour éviter des répétitions inutiles, nous avons cru devoir reporter l'étude de cette question à l'article suivant, où elle sera traitée avec tous les détails qu'elle comporte, en raison de son importance spéciale.

ÉCHAPPEMENT A CHEVILLES.

Considérations générales. — L'échappement à chevilles, qui n'est autre chose qu'un échappement à ancre, dont les deux bras sont reportés du même côté, se trouve naturellement dans des conditions analogues et son tracé, pour des angles de levée et de repos déterminés, peut, par suite, s'effectuer par le même procédé. Seulement, comme les chevilles demi-cylindriques portent une partie du plan incliné, il convient de tenir compte du diamètre de ces chevilles dans le tracé du fuyant de chaque bec.

La disposition des deux becs, d'un même côté de la roue, présente, sur

celle des échappements à ancre ordinaires, l'avantage de ne pas agiter dans leurs trous les pivots de l'axe d'échappement et de ne pas faire accrocher les chevilles, quand la distance primitive des axes de l'échappement et de la roue vient à changer, par suite de l'usure. Cet échappement peut encore continuer à marcher, même lorsque les effets de cette usure sont assez prononcés. Aussi convient-il spécialement pour les grosses horloges et pour toutes les pièces qui ont de lourds pendules à faire mouvoir.

Disposition de l'échappement à chevilles. — Dans la disposition adoptée par Lepaute (M. p. 360, t. II), qui était une modification de l'échappement primitif d'Amant, avec chevilles rondes, l'étendue de la chute avait été diminuée en adoptant, pour la section des chevilles, la forme d'un demi-cercle. De plus, Lepaute faisait agir les deux branches, de même longueur, l'une en avant, l'autre en arrière de la roue, de telle sorte que les repos, ainsi que les impulsions, se fissent à égale distance du centre d'oscillation; la roue portait, à cet effet, deux rangées de chevilles, établies sur les deux faces, avec des rayons légèrement différents.

Dans la disposition moderne (*fig.* 2, Pl. I), on a renoncé à cette précaution, qui, pratiquement, n'a aucune importance, et les deux branches, de longueurs inégales, agissent sur un seul rang de chevilles, fixées d'un seul côté de la roue. On obtient ainsi un réglage aussi exact qu'avec l'échappement de Lepaute, en même temps qu'une plus grande facilité d'exécution.

Dans les échappements de cette espèce que Vulliamy a construits pour des horloges de dimensions colossales et, en particulier, pour celle de Windsor, les leviers ont été rendus mobiles, de manière à ce que la cheville pût reposer constamment sur toute la largeur du bec. Cette disposition, que nous nous bornons à indiquer, n'offre d'utilité que dans le cas où les becs ont à supporter une très-forte pression. On comprend qu'il soit avantageux de répartir alors cette pression sur une surface assez considérable, pour éviter une usure trop rapide des parties en contact.

La différence de longueur des branches n'a pas nécessairement pour conséquence une inégalité des deux impulsions, et on peut même, si on le désire, obtenir une égalité parfaite entre ces impulsions en choisissant convenablement le diamètre des chevilles. Il suffit, pour cela, en supposant les deux fuyants construits sous le même angle, d'admettre, entre les rayons des cercles limitant les chevilles le même rapport qu'entre les longueurs des deux branches. Ainsi, en désignant par L et l ces longueurs, par R et r les rayons des cercles extérieur et intérieur, on doit, entre ces quantités, avoir la proportion :

$$L : l :: R : r.$$

Pour $L = 100^{mm}$, $l = 96^{mm}$, $R = 50^{mm}$, cette relation donne :

$$r = \frac{l \times R}{L} = \frac{96 \times 50}{100} = 48^{mm}.$$

c'est-à-dire que, pour obtenir la même impulsion, il faudrait prendre 48^{mm} pour le rayon du cercle limitant les chevilles à l'intérieur, et le diamètre de ces chevilles devrait, dans ce cas, être égal à $50^{mm} - 48^{mm} = 2^{mm}$. Du reste, cette égalité parfaite des deux impulsions est de peu d'importance et n'est pas de nature à améliorer sensiblement la marche; à ce dernier point de vue, il est parfaitement suffisant que la somme de deux impulsions consécutives soit constante.

Tracé de l'échappement à chevilles moderne. — Supposons, comme pour l'échappement de Graham, que la roue doive battre les secondes, auquel cas elle doit porter 30 chevilles.

Soit O*a* (*fig.* 2, Pl. I) un rayon horizontal de la circonférence passant par les centres des chevilles. Au moyen d'un rapporteur, on divise cette circonférence, à partir de *a*, en 30 parties égales, et les points de division correspondent aux centres des chevilles, dont la distance, mesurée sur la circonférence, se trouve ainsi être égale à $\frac{360^\circ}{30} = 12^\circ$.

Des centres ainsi déterminés, on décrit les demi-cercles représentant les chevilles avec un rayon qui, sur la figure, a été pris égal au quart de la distance entre deux centres consécutifs.

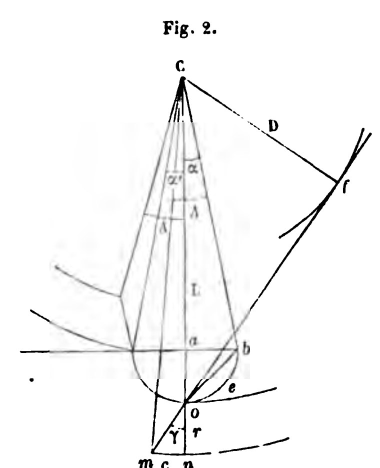
Sur la verticale AL, menée par le point *a*, tangentiellement au cercle des chevilles, on marque le centre d'oscillation A (déterminé comme nous le verrons plus loin), puis, de ce point, comme centre, on décrit deux arcs de cercle, l'un *s* avec le rayon A*a*, l'autre *b*, avec ce même rayon, augmenté du rayon d'une cheville. Du même centre A on décrit ensuite deux arcs *h* et *t*, écartés des premiers d'une quantité égale au rayon des chevilles. Avec ce tracé, rigoureusement exécuté, il n'existe aucun jeu; on doit donc, pour obtenir celui qui est nécessaire à la sûreté des fonctions, adoucir le dessus et le dessous des palettes, en même temps qu'on diminue légèrement l'épaisseur des chevilles sur la partie plate.

Il reste maintenant à déterminer les fuyants des becs, pour une valeur déterminée de la levée.

Ainsi qu'il est facile de le voir sur la *fig.* 2, la levée se décompose en deux parties, dont l'une s'effectue par l'action du quart de cercle *ab* de la cheville sur l'angle d'entrée du plan incliné, tandis que l'autre correspond à l'action du bord *b* de cette cheville sur le plan incliné du bec. La première a une valeur déterminée par le rayon de la cheville et la longueur

de la branche. En désignant par α l'angle de cette partie de la levée, exprimé en degrés, par L la longueur de la branche, par r le rayon de la cheville, et enfin par π ($= 3,14\ldots$) le rapport de la circonférence au diamètre, on a très-approximativement la relation :

Fig. 2.



$$\alpha = \frac{360 \times r}{2\pi L}.$$

Si maintenant on désigne par A le nombre de degrés de la levée complète pour un bec, l'angle décrit par l'action du bord de la cheville sur le plan incliné sera égal à $A - \alpha$. Pour que les deux parties de la levée d'un même bec fussent égales, c'est-à-dire pour qu'on eût $A - \alpha = \alpha$, il faudrait que l'inclinaison du fuyant fût sensiblement de 45°. En dehors de ce cas très-particulier, les deux parties de la levée d'un même bec sont forcément inégales.

Dans le cas général, pour déterminer l'inclinaison d'un des becs, celui de droite, par exemple, on joint le centre d'oscillation C au bord b de la cheville et l'on mène, par ce même centre C, la ligne Cm, de telle sorte qu'elle fasse, avec la précédente, l'angle de levée A, qu'on veut obtenir ; en joignant au point o le point d'intersection m de la ligne Cm avec l'arc inférieur du bec, la ligne mo se trouve représenter le fuyant de ce bec.

La détermination du fuyant de l'autre bec se fait de la même manière ; seulement, dans ce cas, pour une levée A égale à celle de l'autre bec, l'inclinaison du fuyant devrait théoriquement être un peu différente, car l'angle α', produit par l'action du demi-cercle de la cheville, est un peu plus grand que l'angle correspondant α de l'autre bec ; on a, en effet, comme précédemment :

$$\alpha' = \frac{360 \times r}{2\pi . L'}.$$

L' étant plus petit que L, α' est plus grand que α et, par suite, l'angle $A - \alpha'$ est plus petit que l'angle $A - \alpha$. Pratiquement, cette différence est de peu d'importance et l'on peut, sans grand inconvénient, admettre la même inclinaison pour les fuyants des deux becs.

Quoiqu'il en soit, le mode de tracé que nous venons d'indiquer montre que rien ne serait plus facile que d'obtenir l'égalité rigoureuse des deux impulsions, malgré la différence de longueur des bras.

Avant d'aller plus loin, nous devons faire remarquer que la construc-

tion précédente, de même que celle indiquée pour l'échappement de Graham, est soumise, dans la pratique, à un certain nombre de causes d'erreur. En premier lieu, il n'est guère possible de reporter exactement sur le papier des angles aussi petits que ceux dont il s'agit (1° à 2°); en outre, la direction du plan incliné se trouve déterminée au moyen de deux points extrêmement rapprochés, et c'est là, comme on le sait, une condition très-défavorable pour le tracé de la direction d'une ligne.

Autre méthode pour le tracé des fuyants. — Si l'on veut obtenir les fuyants avec plus de précision, il est indispensable de recourir au calcul. A cet effet, supposons qu'on prolonge le plan incliné *mo* du bec de droite, que sur cette ligne prolongée on abaisse une perpendiculaire C*f* et qu'enfin du point C, comme centre, avec C*f* pour rayon, on décrive un cercle. Dans toutes les positions du bec, la ligne *mo* prolongée restera tangente à ce cercle. Inversement, si la grandeur du rayon C*f* était connue, on pourrait décrire le cercle et il suffirait de lui mener une tangente par le point *o* (intersection du demi-cercle de la cheville avec la verticale), pour obtenir le fuyant, sans passer par le tracé de l'angle de levée, et, de plus, avec un très-grand degré de précision.

En conservant les notations précédentes et en désignant, en outre, C*f* par D, *mn* par *c* et *on* par *r*, le triangle rectangle *mno* donne :

$$\overline{om}^2 = c^2 + r^2 \quad \text{ou} \quad om = \sqrt{c^2 + r^2}.$$

D'un autre côté, en comparant les deux triangles semblables C*fo* et *mno*, on obtient :

$$\frac{L}{D} = \frac{\sqrt{c^2 + r^2}}{c} \quad \text{ou} \quad \frac{L}{D} = \sqrt{1 + \frac{r^2}{c^2}}. \qquad (1)$$

Nous avons trouvé précédemment :

$$r = 2\pi L \frac{\alpha}{360}.$$

On a de même :

$$c = 2\pi L \frac{A - \alpha}{360}.$$

Par conséquent :

$$\frac{r}{c} = \frac{\alpha}{A - \alpha}, \quad \text{d'où} \quad \frac{r^2}{c^2} = \frac{\alpha^2}{(A - \alpha)^2}.$$

En substituant cette valeur de $\frac{r^2}{c^2}$ dans l'équation (1), on en tire :

$$D = L \times \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\alpha^2}{(A - \alpha)^2}}},$$

c'est-à-dire que le rayon cherché D est égal à une fraction de la longueur L du bras, représentée par $\frac{1}{\sqrt{1+\frac{\alpha^2}{(A-\alpha)^2}}}$.

Dans le cas particulier où les deux parties de la levée α et $A-\alpha$ seraient égales, cette fraction se réduirait à $\frac{1}{\sqrt{2}}$; le triangle rectangle C*of* serait isocèle et l'angle C*of* égal à 45°, ainsi que l'angle *mon* du fuyant, ce que nous avons déjà trouvé précédemment.

Dans tous les autres cas, où les angles α et $A-\alpha$ sont inégaux, la fraction doit être calculée en substituant à α et $A-\alpha$ leurs valeurs numériques. Si l'on a, par exemple, $\alpha = 1°$ et $A-\alpha = 3/4°$ le radical devient :

$$\sqrt{1+\frac{16}{9}} = \sqrt{\frac{25}{9}} = \frac{5}{3},$$

et, par conséquent :

$$D = L \times \frac{3}{5} = 0{,}6L.$$

Le rayon D serait, dans ce cas, égal à six dixièmes de L. Cet exemple suffit pour montrer que, dans aucun cas, le calcul de D ne saurait présenter de difficultés.

Pour le fuyant de l'autre bec, on peut se dispenser de répéter un calcul analogue. Nous avons vu, en effet, que, dans la pratique, on pouvait, sans erreur sensible, admettre la même inclinaison pour les deux fuyants, de telle sorte que, si les deux bras avaient la même longueur, le second fuyant prolongé devrait être également tangent au cercle décrit du point C avec le rayon D; mais, comme le second bras est plus court que l'autre du double du rayon r de la cheville, il en résulte que le fuyant correspondant doit passer à une distance du centre C égale à $D-2r$ ou, en d'autres termes, qu'il doit être tangent à un second arc de cercle décrit du centre C avec le rayon $D-2r$.

Cette dernière méthode, qui permet de déterminer les inclinaisons des fuyants avec une très-grande précision, est également applicable aux différentes variétés de l'échappement à ancre de Graham, et, comme les longueurs des bras de l'ancre sont égales, les deux fuyants sont tangents au même cercle. Nous avons d'ailleurs indiqué déjà (p. 8) le tracé de ce cercle, comme moyen de vérification, pour les deux fuyants déterminés par la première méthode.

LONGUEUR DES BRAS D'ÉCHAPPEMENT.

Il nous reste maintenant à indiquer quelle est la longueur la plus convenable pour les bras d'un échappement. C'est à M. J. Wagner que revient l'honneur d'avoir le premier appelé l'attention des horlogers sur l'importance de cette question, au point de vue de la bonne marche des échappements à ancre et à chevilles.

Nous allons essayer de résumer les considérations présentées par cet habile praticien dans un mémoire qu'il a soumis à la Société d'Encouragement et nous prendrons, comme lui, pour exemple, l'échappement à chevilles.

Lorsqu'on connaît le diamètre de la roue d'échappement et le nombre des chevilles, on a, comme conséquence forcée, la hauteur des deux becs. Cette hauteur étant ainsi déterminée, l'inclinaison du plan d'impulsion de chaque bec dépend de trois éléments : l'ouverture de l'angle de levée, la longueur des bras et la hauteur des becs.

Supposons donné l'angle de levée ; cet angle peut évidemment conserver la même valeur, quelle que soit la longueur des bras de l'échappement; seulement, l'inclinaison du plan d'impulsion des becs, pour une même hauteur, doit nécessairement varier en raison de cette longueur et être d'autant plus forte que les bras sont plus courts.

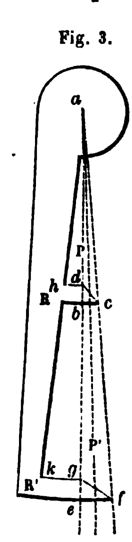
Cela posé, il est facile de prouver que, pour une même épaisseur de bec *e* et une même levée A, l'impulsion reste la même, quelle que soit la longueur des bras de l'échappement. Pour simplifier le raisonnement, nous pouvons admettre que la levée totale A, au lieu de se décomposer en deux, α et $A-\alpha$, correspondant, l'une à la cheville, l'autre à l'incliné du bec, soit uniquement produite par ce dernier, ce qui revient à supposer la cheville réduite au quart de cercle situé à gauche de la verticale de l'axe d'oscillation (*fig.* 2) et agissant alors sur l'incliné du bec simplement par son arête *o*. — Dans ces conditions, l'incliné ou le fuyant, pour une longueur de bras quelconque, se déterminera en traçant, comme dans la *fig.* 3, l'angle *eaf* égal à l'angle de levée et en joignant les deux points d'intersection des côtés de cet angle avec les deux arcs de cercle qui limitent le bec.

Les deux becs *hdcb* et *kgef*, tracés sur la figure, appartiennent à deux bras, dont le second a une longueur double du premier. L'inclinaison d'un plan incliné étant mesurée par le rapport de la hauteur à la base, il en résulte que l'inclinaison du petit bras est le double de celle du grand, car *ef* est le double de *bc*. Il est, d'ailleurs, inutile de faire remarquer que la démonstration suivante s'applique à un rapport quelconque entre les deux bras.

Si l'on suppose la roue d'échappement mise successivement en action

sur chaque bec, elle exercera sur le fuyant un effort constant Q, dirigé, à chaque instant, perpendiculairement au rayon qui passe par le point de contact, c'est-à-dire suivant les tangentes successives au cercle que décrit ce point dans le mouvement de la roue. Le travail de cette force Q, pendant la durée du contact ou de l'impulsion, s'obtiendra, comme on le sait, en multipliant l'effort par l'arc parcouru; or, cet arc, à un infiniment petit près, peut être remplacé par la corde correspondante, qui est ici égale à l'épaisseur du bec *e*. Le travail transmis sera donc Q*e*, pour le bec *dcb*, comme pour le bec *gfe*.

Fig. 3.



Le mouvement de la roue d'échappement, pendant l'impulsion, pouvant être regardé comme uniforme, il en résulte que le travail moteur doit être équivalent au travail résistant, qui est précisément la mesure de l'impulsion. Afin d'évaluer ce travail pour les deux becs, désignons par P et P' les résistances agissant normalement à la direction des bras. Pendant la durée de l'impulsion, le chemin décrit par la force P, dans la direction de cette force, est la base même du plan incliné, c'est-à-dire *bc*; le travail résistant, pour le bec du bras le plus court, sera donc $P \times bc$. De même, pour l'autre bec, le travail correspondant sera $P' \times ef$.

Ces deux travaux résistants devant tous les deux être égaux au travail moteur Q*e*, il en résulte qu'on doit avoir : $P \times bc = P' \times ef$, c'est-à-dire que les impulsions, pour les deux longueurs de bras, ont la même valeur.

On voit, d'après cela, qu'au point de vue de l'impulsion, la longueur des bras de l'échappement est indifférente, mais il n'en est pas de même du travail des frottements, dont l'intensité augmente avec cette longueur.

Si l'on se reporte, en effet, à la figure, on voit que, pour un même angle de levée, les arcs complémentaires, c'est-à-dire les parties sur lesquelles frottent les chevilles, pendant les repos, sont proportionnels à leurs rayons ou aux longueurs des bras. La pression Q de la roue d'échappement étant constante et s'exerçant normalement à ces arcs, le frottement, qui lui est proportionnel et représenté par *f*Q, est aussi constant; comme il agit dans une direction perpendiculaire à la pression, c'est-à-dire suivant la direction même de l'arc complémentaire, son travail est égal à *f*Q multiplié par la longueur de cet arc. On a donc, pour expression de ce travail, $fQ \times hd$, dans le premier cas, et $fQ \times kg$ dans le second. Les arcs *hd* et *kg* étant proportionnels aux longueurs des bras, il en résulte que le travail du frottement sur les courbes de repos augmente en raison directe de la longueur des bras.

Pour les fuyants, le travail du frottement augmente également avec

cette longueur, mais un peu moins rapidement que pour les arcs de repos. Il est facile de s'en assurer en remarquant que le fuyant *dc*, par exemple, est l'hypothénuse d'un triangle rectangle, dont les deux autres côtés sont *bc* et *bd*. Le carré construit sur l'hypothénuse étant égal à la somme des carrés faits sur les deux autres côtés, on a :

$$\overline{cd}^2 = \overline{bc}^2 + \overline{bd}^2.$$

De même, en considérant le second fuyant *fg*, on a :

$$\overline{fg}^2 = \overline{fe}^2 + \overline{ge}^2.$$

Si la longueur du fuyant croissait proportionnellement à la longueur des bras, *fg* devrait être le double de *cd* et, par suite, $\overline{fg}^2$ le quadruple de $\overline{cd}^2$. Or, *fe* est bien le double de *bc* et $\overline{fe}^2$ le quadruple de $\overline{bc}^2$, mais il n'en est pas de même des autres termes *ge* et *bd*, qui sont égaux. La longueur du fuyant augmente donc un peu moins rapidement que si elle était proportionnelle à la longueur des bras, mais elle augmente et, par conséquent, le travail du frottement sur le fuyant augmente aussi.

De ce qui précède on doit conclure que, plus on donne de longueur aux bras d'un échappement, plus le travail du frottement est considérable et plus, par conséquent, il y a de chances d'irrégularités dans la marche de l'horloge à laquelle est appliqué cet échappement.

Cette conclusion est générale et applicable à tous les échappements simples dont il a été précédemment question.

Pour diminuer l'influence des frottements, il convient donc de réduire, autant que possible, la longueur des bras d'échappement, sans atteindre, toutefois, la limite où l'on serait exposé à rencontrer des inconvénients d'un autre genre, qui viendraient compenser, et au delà, les avantages provenant de cette réduction.

Ainsi, par exemple, nous avons vu que les fuyants sont d'autant plus inclinés que les bras sont plus courts. Or, il est évident qu'un même degré d'usure doit diminuer d'autant plus la grandeur des oscillations que les fuyants sont plus rapides. De même, l'agrandissement des trous de pivots diminue d'autant plus la grandeur de la levée que les bras sont plus courts.

Tous ces avantages et ces inconvénients doivent être pris en sérieuse considération, lorsqu'on veut déterminer la longueur la plus convenable à adopter pour les bras. Nous essayerons un peu plus loin de tracer la marche à suivre, en nous appuyant, à la fois, sur les indications de la théorie et les résultats tirés de l'observation d'appareils existants. Pour le moment, nous nous bornerons à faire remarquer qu'un grand nombre d'horloges et de pendules possèdent des échappements à ancre, dont les

branches, bien que relativement très-réduites, n'ont présenté aucune difficulté d'exécution et n'ont pas donné lieu à une usure trop rapide. D'après cette observation, due à M. J. Wagner, il semble rationnel d'admettre, avec lui, que les échappements de Graham, à chevilles et autres, pourraient, sans inconvénients, être réduits aux dimensions des plus petits échappements à ancre employés, à la condition, bien entendu, de soigner d'autant plus l'exécution que les bras seraient plus courts. En particulier, pour les régulateurs et les grosses horloges, les dimensions des échappements de Graham et de ceux à chevilles pourraient être réduites, au moins, à la moitié de celles qu'on rencontre dans les types dont l'exécution remonte à une trentaine d'années.

On obtiendrait ainsi une régularité plus grande et, comme le travail des frottements diminue en raison de la diminution de longueur des bras, le même poids moteur produirait, toutes choses égales d'ailleurs, des oscillations plus étendues, qu'on pourrait réduire, si on le jugeait convenable, soit en augmentant le poids du pendule, soit en diminuant la force motrice.

Expériences de M. J. Wagner. — Avant d'aller plus loin, il nous paraît utile de faire connaître les expériences auxquelles M. J. Wagner s'est livré pour confirmer l'exactitude des considérations théoriques qui précèdent. Ces expériences ont été exécutées au moyen d'un petit appareil très-ingénieux, qui n'est autre chose qu'un échappement, dont les bras ont des longueurs variables et qui permet, non-seulement de vérifier le principe énoncé précédemment, mais encore de comparer les résistances du frottement correspondant à des bras de longueurs différentes.

Cet appareil, que représente la *fig.* 3, Pl. I, se compose d'un double bâti *bb*, monté sur une plaque horizontale *dd*, avec vis de calage XX, et qui porte, en *a*, l'axe d'un bras d'échappement, à pivots très-fins, pour diminuer le frottement. Sur la longueur de ce bras sont disposés trois becs *i*, *j*, *k*, tous de même épaisseur, afin qu'on puisse y appliquer une même roue ; leurs distances à l'axe *a* sont respectivement dans le rapport des nombres 1, 8 et 16. Ces trois becs ont exactement la même levée, qu'on peut vérifier au moyen d'une division tracée sur le bec du bas et d'un index fixé à la base *d*.

L'axe de l'échappement porte un bras horizontal *l*, à l'extrémité duquel peut être suspendu un plateau de balance, dans les conditions admises pour les balances de précision ; un second bras vertical, monté sur le même axe, est muni d'un poids curseur *r*, au moyen duquel on peut équilibrer tout l'appareil, sans y comprendre toutefois le plateau de la balance. Dans l'état d'équilibre de l'appareil, ce plateau repose, par son couteau, sur une pièce fixe du bâti, et le bras *l* n'arrive à le toucher qu'au moment où le bras *cc* commence à reculer sous l'action exercée, sur l'un

des fuyants, par le rayon F, qui représente une des dents de la roue d'échappement. Cette dent est mobile autour d'un axe *o*, disposé dans une chape à coulisse P, qu'on peut fixer, à volonté, en un point du montant vertical *v*, de manière à placer la dent F à la hauteur de l'un quelconque des becs. Le corps de cette dent, qui est fileté, porte une masse *m* formant écrou et qui, par son rapprochement ou son éloignement du centre de rotation *o*, permet de diminuer ou d'augmenter l'action de la dent sur les becs.

L'appareil étant ainsi disposé, on commence par mettre la dent F dans la position convenable pour attaquer l'un des becs et on place, dans le plateau de la balance, le poids nécessaire pour tenir l'appareil en équilibre, au moment où la dent agit sur le fuyant. En conservant le même poids dans le plateau, on amène successivement la dent en regard des deux autres becs et on constate que l'appareil reste en équilibre dans ces deux nouvelles positions. Ce qui prouve d'abord que, abstraction faite des frottements, la longueur des bras d'échappement est tout à fait indifférente au point de vue de l'impulsion.

Le même appareil permet également de déterminer l'influence croissante du frottement avec la longueur des bras.

Il suffit, pour cela, de placer la dent F sur un point quelconque de l'une des courbes de repos et de chercher le poids qu'il faut placer dans le plateau, pour vaincre le frottement que la dent exerce sur cette courbe et déterminer le mouvement de l'échappement. On trouve que ce poids est variable avec le rayon de la courbe et qu'il augmente sensiblement en raison directe de la longueur des bras d'échappement.

L'expérience confirme donc bien nettement le principe théorique, établi précédemment, que, abstraction faite du frottement, il est indifférent, pour l'impulsion, que les bras de l'échappement soient longs ou courts, mais qu'en tenant compte de ce frottement, la longueur de ces bras doit être *la plus courte possible.*

Le raccourcissement des bras doit, d'ailleurs, comme nous l'avons déjà dit, être limité par certaines considérations pratiques. En premier lieu, si l'on diminuait la longueur des bras au delà d'une certaine limite, le fuyant deviendrait trop rapide et ne présenterait plus assez de sûreté pour qu'il pût, après un certain degré d'usure, conserver son angle de levée primitif. En outre, l'action des dents ou des chevilles, en s'exerçant trop près de l'axe d'oscillation, tendrait à le repousser constamment à droite et à gauche, et ne tarderait pas à produire, dans les trous des pivots, un jeu qui aurait également pour conséquence de diminuer la levée.

En tenant compte de ces dernières considérations, M. J. Wagner est arrivé à déterminer, d'une manière générale et pour toutes les applications, des longueurs de bras fixes et invariables.

Avant d'exposer les résultats des nouvelles recherches de ce savant

constructeur, nous devons faire remarquer que, jusqu'à l'époque de la publication de son mémoire, la longueur des bras d'un échappement se déterminait plus ou moins empiriquement, en admettant qu'elle devait être dans un certain rapport, soit avec le rayon de la roue, soit avec la longueur du pendule.

Le premier mode de détermination serait, à la rigueur, rationnel, si l'on s'imposait la condition que, pour un rayon de roue déterminé, le nombre des dents ou des chevilles eût également une valeur donnée.

Mais, en réalité, rien n'empêche de faire varier le diamètre de la roue, à la condition de faire varier également le nombre des chevilles, de telle sorte qu'elles conservent le même écartement. Dans ces conditions, un échappement quelconque, muni de son pendule et conservant le même angle de levée, pourra, sans modification de son effet, s'adapter à toutes les grandeurs de roue, puisque les becs conserveront la même hauteur.

On comprend, d'après cela, qu'il n'y ait pas lieu de chercher à établir un rapport déterminé entre ces deux éléments, puisque l'un d'eux peut varier à volonté, sans entraîner aucun changement pour l'autre.

La même observation s'applique au rapport entre la longueur des bras et celle du pendule, puisqu'on peut modifier, à volonté, cette dernière longueur, sans changer les arcs parcourus.

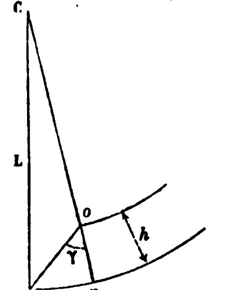
Il paraît, dès lors, bien préférable, comme l'a proposé M. J. Wagner de déterminer la longueur des bras en fonction de l'arc parcouru par le pendule et de la hauteur des becs.

Pour cela, il est nécessaire d'établir la relation qui existe entre les divers éléments d'un échappement. Si l'on désigne par L la longueur C*m* (*fig.* 4) d'un bras, A l'angle de levée, γ l'angle du plan incliné du bec, le triangle rectangle *mon* donne :

$$mn = h \operatorname{tang} \gamma.$$

D'un autre côté, les arcs, dans un même cercle, étant proportionnels aux angles au centre correspondants, on a :

Fig. 4.



$$\frac{mn}{2\pi . L} = \frac{A}{360} \quad \text{ou} \quad mn = \frac{2\pi . L . A}{360}.$$

En égalant les deux valeurs de *mn*, on obtient finalement la relation :

$$h \operatorname{tang} \gamma = \frac{2\pi L . A}{360}. \qquad (1)$$

Cette relation, qui existe entre l'angle γ du plan incliné, la longueur du bras L, la hauteur *h* des becs et l'angle A de la levée, exprime que :

1° Pour un même angle du plan incliné et une même hauteur des becs, la longueur du bras de levée doit être en raison inverse de l'angle de levée;

2° Pour un même angle du plan incliné et un même angle de levée, la longueur du bras doit être directement proportionnelle à l'épaisseur des becs.

Si donc on détermine préalablement l'angle du plan incliné et la hauteur des becs, la formule fournira les longueurs de bras correspondant aux différentes valeurs de l'angle de levée dont on peut avoir besoin.

Nous avons signalé précédemment l'inconvénient que présenterait un plan incliné trop rapide; il convient donc de limiter cette inclinaison par cette condition que le plan puisse transmettre, d'une manière sûre et durable, l'action de la roue au pendule.

D'après des relevés faits sur un grand nombre de pièces d'horlogerie, M. J. Wagner a trouvé que l'angle des plans inclinés variait, suivant les constructeurs, de 18° à 40° environ, et il a proposé d'admettre un angle de 25°, qui est sensiblement la moyenne des limites précédentes et qui présente toutes les conditions désirables pour une bonne marche. Chaque constructeur pourra, d'ailleurs, adopter, suivant les cas, une valeur différente pour cet angle, s'il le juge convenable; le mode de détermination des longueurs de bras restera le même. Au lieu de l'angle de 25°, nous prendrons celui de 27°, qui en diffère très-peu et qui, au point de vue du calcul, offre cet avantage que sa tangente trigonométrique est égale à 1/2, c'est-à-dire qu'on a dans ce cas $\operatorname{tang}\gamma = 0,5$, ou que la base *mn* du petit triangle *mon* est juste la moitié de la hauteur *no* du bec.

Admettons, en outre, pour fixer les idées, que la hauteur des becs, laquelle est la moitié de l'intervalle des dents (au jeu près), soit de 8 millimètres, et proposons-nous de trouver la longueur des bras pour un angle de levée de 1°.

Par la substitution de ces données, la formule (1) devient:

$$0,008 \times 0,5 = \frac{2\pi}{360} \times L \times 1.$$

π, qui est le rapport de la circonférence au diamètre, peut être pris égal à 3,14, et l'on a alors pour la valeur de L:

$$L = \frac{0,008 \times 0,5 \times 360}{2 \times 3,14} = 0^{m},229,$$

ou, en nombre rond, $0^{m},23$.

Ainsi, pour un plan incliné de 27°, une hauteur de becs de 8 millimètres et une levée de 1°, la longueur des bras devrait être de 230 millimètres.

Si la levée, au lieu d'être de 1°, devait être de 2°, 3°, 4°, 5°..., les

autres éléments de l'échappement étant supposés rester les mêmes, on obtiendrait les longueurs de bras correspondantes, en divisant le nombre précédent par 2, 3, 4, 6..., ce qui donnerait les valeurs suivantes 115mm, 77mm, 58mm, 39mm....

La formule (1) montre que la longueur des bras est directement proportionnelle à la hauteur des becs; si donc, en conservant l'angle d'inclinaison du plan et les angles de levée précédemment indiqués, on veut changer la hauteur des becs, lui donner, par exemple, 2 millimètres au lieu de 8 millimètres, les longueurs des bras pourront se déduire des précédentes en les multipliant par le rapport $\frac{2}{8}$ ou $\frac{1}{4}$, c'est-à-dire que, pour la levée de 1°, on aura $\frac{230}{4}$ ou 57mm,5, pour celle de 2°, $\frac{115}{4}$ ou 28mm,7, et ainsi de suite.

La longueur des bras étant également, d'après la formule, proportionnelle à la tangente de l'angle du plan incliné, il en résulte que si l'on voulait adopter, pour cet angle, une autre valeur, 20° par exemple, la longueur des bras, toutes choses égales d'ailleurs, se trouverait réduite dans le rapport $\frac{\text{tang } 20°}{\text{tang } 27°}$ ou sensiblement $\frac{36}{50}$.

En résumé, la formule $h \text{ tang } \gamma = \frac{2\pi L \, . \, A}{360}$, qui relie les quatre éléments d'un échappement, h, tang γ, L et A, permet de déterminer très-simplement l'un quelconque de ces éléments, lorsque les trois autres sont fixés. Si l'on choisit pour γ une valeur différente de celle que nous avons supposée, on aura à chercher la valeur de la tangente trigonométrique de cet angle. Presque tous les aide-mémoire contiennent des tables des différentes lignes trigonométriques, mais, afin de dispenser de toute recherche, nous donnons ici les valeurs des tangentes pour les angles compris entre 18° et 41°.

γ	TANG. γ	γ	TANG. γ	γ	TANG. γ
18°	0,325	26°	0,488	34°	0,675
19°	0,344	27°	0,509	35°	0,700
20°	0,364	28°	0,532	36°	0,726
21°	0,384	29°	0,554	37°	0,753
22°	0,404	30°	0,577	38°	0,781
23°	0,424	31°	0,600	39°	0,810
24°	0,445	32°	0,625	40°	0,839
25°	0,466	33°	0,649	41°	0,869

Comme exemple d'application de la formule, supposons qu'on veuille déterminer la longueur des bras d'un échappement, pour une épaisseur

de bec de 3 millimètres, une inclinaison du fuyant de 31° et un angle de levée de 2°. Dans ce cas, tang $\gamma = 0{,}600$, et la formule donne :

$$L = \frac{h.\,\text{tang}\gamma.360}{2\pi.A} = \frac{0{,}003 \times 0{,}600 \times 360}{2 \times 3{,}14 \times 2} = 0^{m}{,}051$$

La longueur des bras devrait donc être de 51 millimètres.

Si le diamètre de la roue d'échappement et le nombre des dents se trouvaient fixés à l'avance, la hauteur des becs serait forcément déterminée, puisqu'elle doit être, au jeu près, la moitié de l'écartement de deux dents consécutives. Dans ce cas, la formule (1) peut se mettre sous une autre forme : si l'on désigne par R le rayon de la roue et N le nombre des dents, la distance entre deux pointes est représentée par $\frac{2\pi R}{N}$ et, par suite, la hauteur théorique h des becs par $\frac{2\pi R}{2N}$ ou $\frac{\pi R}{N}$. En remplaçant h par cette valeur, la formule (1) devient :

$$\frac{\pi R}{N}\,\text{tang}\gamma = \frac{2\pi L.A}{360},$$

ou

$$L = \frac{180\,R.\,\text{tang}\gamma}{N.A}. \qquad (2)$$

Dans cette nouvelle formule, il entre cinq quantités arbitraires, au lieu de quatre, ce qui devait être, puisque l'épaisseur h se trouve ici remplacée en fonction de R et N, qui ne figuraient pas dans la première formule. La relation (2) montre nettement qu'il n'existe pas un rapport constant entre L et R, c'est-à-dire qu'on ne peut pas déduire la longueur du bras de la valeur du rayon. Le rapport $\frac{L}{R}$ est nécessairement variable entre des limites très-éloignées, suivant les valeurs adoptées pour les trois autres quantités γ, A et N.

La méthode que nous venons d'indiquer pour la détermination de la longueur des bras d'échappement est générale et s'applique également aux échappements dont les dents portent une partie des fuyants ou même ces fuyants tout entiers. Seulement, dans ce cas, il est évident que les becs auront une hauteur d'autant plus faible que les dents porteront une plus grande partie des fuyants. En d'autres termes, la somme des hauteurs du fuyant du bec et de la dent sera égale à la hauteur qu'on devrait avoir dans le cas où le fuyant se trouverait entièrement sur le bec.

Cas particulier de l'échappement à chevilles. — Pour l'échappement à chevilles, la longueur des bras se détermine encore par la même méthode. Toutefois, dans ce cas, l'action de la partie courbe de la cheville peut

différer sensiblement de celle qui serait produite par un plan incliné de même inclinaison que le fuyant du bec. En effet, comme nous l'avons déjà fait remarquer (p. 11), la levée totale se compose de deux parties, dont l'une correspond à l'action de la partie courbe de la cheville sur l'arête supérieure du bec, l'autre à l'action de l'arête supérieure de la cheville sur le fuyant lui-même.

Si la cheville (ce qui a ordinairement lieu) a rigoureusement la forme d'un demi-cercle, la partie courbe *oeb* (*fig.* 2) pourrait être remplacée, au point de vue de la levée, par le plan *ob*, qui est incliné à 45° sur la verticale, puisque le triangle rectangle *aob* est isocèle. Le fuyant *om* du bec peut avoir une inclinaison plus faible, et c'est généralement ce qui a lieu dans la pratique. Pour les motifs invoqués précédemment, cette inclinaison, mesurée par l'angle *mon*, doit, autant que possible, ne pas s'écarter beaucoup de la valeur moyenne 27°.

Désignons, comme précédemment, cet angle par γ; la hauteur du bec est égale au rayon r de la cheville; les deux longueurs C*m* et C*b* ne diffèrent de la longueur C*o* = L que d'une quantité très-petite, qui peut être négligée sans le moindre inconvénient. Si nous désignons par A l'angle de levée et par α la partie de cette levée qui correspond à l'action de la partie courbe de la cheville, l'angle *m*C*o* sera égal à $A - \alpha$.

Avec ces notations, nous trouverons comme plus haut :

$$mn = r.\tang\gamma \quad \text{et} \quad \frac{mn}{2\pi.L} = \frac{A-\alpha}{360},$$

ou, en égalant les deux valeurs de *mn* :

$$r\tang\gamma = \frac{2\pi L(A-\alpha)}{360}. \tag{3}$$

On a de même :

$$\frac{r}{2\pi L} = \frac{\alpha}{360},$$

ou

$$r = \frac{2\pi L.\alpha}{360}. \tag{4}$$

Si, entre les deux équations (3) et (4), on élimine α, on obtient la relation très-simple :

$$r(1+\tang\gamma) = \frac{2\pi L.A}{360}. \tag{5}$$

Comme tang 45° = 1, cette relation peut encore se mettre sous la forme :

$$r(\tang 45° + \tang\gamma) = \frac{2\pi L.A}{360}.$$

Pour que les deux parties de la levée fussent égales, il faudrait qu'on eût $\tang\gamma = 1$, ou $\gamma = 45°$. Si on prend, au contraire, pour γ, la valeur moyenne $27°$, $\tang\gamma = 0,5$, et la levée produite par le fuyant du bec n'est que le tiers de la levée totale A.

La formule (5), avec la table de la page 22, permet de déterminer, dans tous les cas, la valeur de L, lorsque les autres éléments sont fixés; on tire en, effet, de cette formule, en réduisant les facteurs numériques :

$$L = \frac{360}{2\pi} \times \frac{r(1+\tang\gamma)}{A} = 57,3 \times \frac{r(1+\tang\gamma)}{A}.$$

Pour $\gamma = 27°$, $A = 2°$, $r = 0^m,008$, on trouve :

$$L = \frac{57,3 \times 0,008 \times 1,5}{2} = 0^m,344.$$

Si le rayon R de la roue d'échappement était donné, ainsi que le nombre N des chevilles, le rayon r se trouverait déterminé et égal à $\frac{2\pi R}{4N}$, puisqu'il doit être le quart de la distance de deux chevilles consécutives. En substituant cette valeur de r dans l'équation (5), elle devient :

$$\frac{2\pi R}{4N}(1+\tang\gamma) = \frac{2\pi L . A}{360};$$

d'où l'on tire :

$$L = \frac{R(1+\tang\gamma) \times 360}{4.N.A} = \frac{90R(1+\tang\gamma)}{N.A}. \qquad (6)$$

Relation qui, comme la relation (2), a lieu entre cinq quantités arbitraires, L, R, N, A et $\tang\gamma$.

Si l'on prend $\tang\gamma = 0,5$, $N = 30$, $A = 1°\ 1/2$, on trouve :

$$L = \frac{90 \times 1,5 . R}{30 \times 1,5} = 3R;$$

c'est-à-dire que, dans ce cas particulier, le bras devrait avoir une longueur égale à trois fois le rayon ou une fois et demie le diamètre de la roue d'échappement. Ce rapport se trouve être précisément celui que Lepaute avait conseillé d'adopter dans tous les cas. Mais les considérations précédentes montrent que ce rapport ne saurait être constant et qu'il doit nécessairement varier avec les valeurs adoptées pour les trois autres éléments qui entrent dans la formule (6), en même temps que L et R.

Si nous reprenons la formule générale $L = \frac{h \tang\gamma . 360}{2\pi . A}$, nous voyons

que, pour des valeurs données de h et de tang γ, c'est-à-dire pour un fuyant qui a une hauteur et une inclinaison déterminées, la longueur L du bras de l'échappement doit être en raison inverse de l'angle de levée A. Cet angle lui-même dépend essentiellement de l'angle total d'oscillation du pendule, lequel est d'autant plus faible que le pendule est plus long. Il en résulte que la longueur du bras d'échappement est d'autant plus grande que le pendule est plus long ; en d'autres termes, le point d'impulsion du bec doit s'éloigner ou se rapprocher du centre de rotation à peu près dans le même rapport que le centre de gravité du pendule. Dans ces conditions, l'influence de la poussée latérale sur les pivots reste sensiblement la même avec les pendules longs qu'avec les pendules courts.

DE LA TANGENCE DES ÉCHAPPEMENTS.

C'est encore M. J. Wagner qui, dans son Mémoire sur les Échappements, a démontré le premier la nécessité de placer tout échappement à la tangente, si l'on voulait arriver à la production du minimum de frottement et réaliser, par suite, pour le mouvement, la plus grande liberté possible.

Un échappement est dit tangent, lorsque son centre d'oscillation se trouve placé sur la tangente menée à la roue par la pointe de la dent qui se trouve en contact avec le milieu de l'un des becs.

Si AB (*fig.* 5) est le rayon de la roue d'échappement, c'est sur la perpendiculaire AC à ce rayon (ou la tangente au cercle de la roue) que doit être placé le centre d'oscillation d'un échappement quelconque, pour que la pression de la dent sur la surface frottante de cet échappement soit la plus faible possible, et donne lieu, par suite, au minimum de frottement, tant sur les pivots et les parties frottantes de l'échappement que sur les pivots de l'axe de la roue.

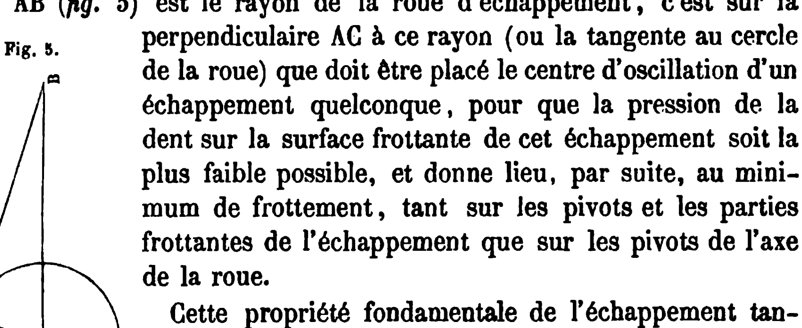


Fig. 5.

Cette propriété fondamentale de l'échappement tangent a été souvent négligée et méconnue. Comme elle est de nature à rendre la marche des pièces plus régulière et à diminuer l'usure, il nous paraît utile de la démontrer ici, en suivant la marche indiquée par M. J. Wagner.

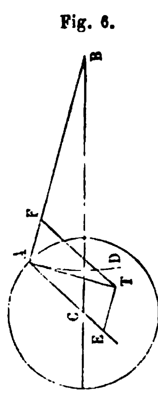
Démonstration théorique. — Nous ferons d'abord remarquer que tout corps mis en mouvement par l'extrémité d'un rayon, mobile autour de son centre, reçoit une impulsion dirigée normalement à ce rayon ou tangentiellement au cercle décrit par le point de contact. Dans ces conditions, l'effort exercé par le rayon sur la surface de l'échappement se trouve directement transmis aux pivots de l'axe de cet échappement, qui

ne reçoivent aucune autre pression. Quant aux pivots de l'axe de la roue, ils n'éprouvent aucune pression résultant de l'action du contact de la dent avec la partie du repos de l'échappement.

Mais il n'en est plus de même, lorsque le centre d'oscillation ne se trouve plus placé sur la tangente au cercle de la roue.

Supposons, par exemple, que le rayon AB de la roue attaque l'échappement en un point A (*fig.* 6), de telle sorte que la perpendiculaire à AB, c'est-à-dire la tangente AT à l'arc AD, décrit du point B, passe en dehors du centre C de l'échappement. L'action du rayon sur l'échappement, au point A, étant dirigée suivant cette tangente, nous pouvons la représenter par la longueur AT, que nous supposerons, par exemple, égale au rayon AC. Cette action peut être considérée comme la résultante des deux forces AF et AE, obtenues en construisant le parallélogramme AETF et dirigées, la première suivant AB et la seconde suivant la ligne AC, passant par le centre d'oscillation C. La longueur AE représente la pression que reçoivent les pivots et la surface de l'échappement et elle est supérieure, comme on le voit, au rayon AC = AT, qui, d'après notre hypothèse, mesure l'impulsion, tandis que, dans la disposition précédente, cette pression était précisément égale à l'impulsion et se trouvait représentée par AC. De même, les pivots de la roue ont à supporter une pression, représentée par AF et qui, dans l'échappement à la tangente, n'existe pas.

Fig. 6.



Les deux composantes AE et AF ont, d'ailleurs, des valeurs d'autant plus considérables que le rayon BA est plus incliné sur la ligne AC, c'est-à-dire que l'échappement se fait plus loin de la tangente.

Cette augmentation des pressions et, par suite, des frottements se traduit naturellement, toutes choses égales d'ailleurs, par une destruction et une usure plus rapides, et c'est là une conséquence qu'il est facile de vérifier dans la pratique, en comparant les divers échappements simples en usage. Ainsi, par exemple, l'échappement *Duplex*, dans lequel l'attaque se fait très-loin de la tangente, offre, à ce point de vue, un inconvénient incontesté, qui ne peut être atténué que par une exécution extrêmement soignée.

Vérification expérimentale.— Pour vérifier expérimentalement la vérité du principe auquel conduisent les considérations théoriques que nous venons d'exposer, M. J. Wagner a construit l'appareil représenté, en élévation et en plan, par les *fig.* 4 et 5 (Pl. I).

Cet appareil permet de mesurer facilement les frottements qui correspondent à une même action de la roue sur les divers points de l'échappement, pour des positions différentes du point de contact, relativement à la tangente.

Une plaque horizontale *a*, reposant sur quatre pieds *bb*, reçoit deux axes verticaux *c* et *e*. Le premier *c*, mobile sur deux pivots très-fins (pour en réduire le frottement), porte à sa partie supérieure un levier *d*, dont l'un des bras, celui de droite, se termine par une saillie, figurant une dent de la roue d'échappement, tandis que l'autre sert uniquement à assurer un équilibre parfait. Le second axe *e*, également mobile sur deux pivots, porte à sa partie supérieure un disque *f*, représentant un cylindre ou la partie de repos d'un échappement quelconque.

Le rayon *d* est maintenu pressé contre le disque *f*, au moyen d'une petite soie, qui passe sur une poulie *g* et porte, à sa partie inférieure, un plateau de balance *h*. En chargeant plus ou moins ce plateau, il est évident qu'on doit produire un frottement plus ou moins considérable, tant sur les pivots que sur le contour du disque *f*. Autour de ce disque s'enroule une seconde soie, qui vient passer sur la poulie *i* et supporte également un plateau de balance *j*, destiné à recevoir le poids rigoureusement nécessaire pour vaincre le frottement produit par la charge du plateau *h*.

L'axe *c* et le rayon *d* sont montés sur une plaque *l*, ajustée à coulisse, qu'on peut faire mouvoir au moyen de la vis de rappel *k*, de telle sorte qu'on peut faire varier, à volonté, la position du rayon *d* par rapport au disque *f*.

On commence par amener ce rayon *d* dans la position où il est tangent, on met une certaine charge sur le plateau *h* et l'on détermine le poids qui, placé sur le plateau *j*, arrive à vaincre les frottements, c'est-à-dire celui pour lequel ce plateau commence à se mettre en mouvement. Cela fait, en conservant la même charge sur le plateau *h*, on fait varier progressivement la position du rayon *d* et l'on reconnaît qu'à mesure qu'on s'éloigne ainsi davantage de la tangente, le poids à placer sur le plateau *j*, pour vaincre les frottements, va constamment en augmentant.

Ainsi, pour une impulsion constante, représentée par la charge mise sur le plateau *h*, les frottements sont d'autant plus considérables que la direction du rayon *d* de la dent est plus éloignée de la tangente.

Pour que la pression s'exerce bien toujours suivant une perpendiculaire au rayon *d*, la poulie *g* se trouve placée sur un rayon *m*, dont le centre de rotation est le même que celui de *d* et qui porte un bras *m'*, qu'on peut toujours mettre en contact avec *d*, au moyen de la vis *n*. Il est donc possible de faire suivre à la poulie *g* le mouvement du rayon *d*, de telle sorte que la soie reste constamment perpendiculaire à ce rayon. Cela fait, on desserre la vis *n*, pour rendre le rayon *d* complétement indépendant.

Le même appareil permet également de mesurer les pressions transmises aux pivots de l'axe de la roue d'échappement.

A cet effet, le pivot supérieur de l'axe *c* est maintenu par un petit pont *o*; le trou de ce pivot dans le pont est coupé par la moitié, et la partie

enlevée est remplacée par un disque rond *p*, monté sur un axe mobile, dont les pivots sont très-fins et très-libres. Autour de ce disque s'enroule une soie, qui vient passer sur la poulie de renvoi *q* et se termine par un plateau de balance *r*. C'est dans ce plateau qu'on place les poids nécessaires pour produire le mouvement uniforme du disque *p*, c'est-à-dire pour vaincre les frottements correspondants aux pressions variables qu'éprouve le pivot, lorsqu'on fait varier la position du rayon *d* par rapport à la tangente. La pression, exercée sur le pivot dans chaque position, est celle qui, dans la *fig.* 6, se trouve représentée par AF et qui se transmet à l'axe B de la roue.

L'expérience montre que le poids à placer sur le plateau *r* est d'autant plus considérable que l'échappement agit plus loin de la tangente.

PRINCIPES GÉOMÉTRIQUES DE L'ÉCHAPPEMENT A CYLINDRE.

Généralités.— L'échappement à cylindre, qui appartient à la classe des échappements à repos frottant, ne peut guère être employé que dans les pièces d'horlogerie de petites dimensions, comme les montres, c'est-à-dire avec un balancier dont le parcours angulaire soit relativement considérable.

Cet échappement repose sur les mêmes principes que les échappements simples précédemment décrits, avec cette différence qu'il ne prend qu'une seule dent entre ses deux becs (*lèvres*), ce qui a l'avantage de permettre le plus grand rapprochement possible des axes de l'échappement et de la roue. Les surfaces des repos prolongés donnent une portion de cylindre annulaire (*l'écorce*), qui est montée directement sur l'axe du balancier.

Nous ne reviendrons pas sur le fonctionnement de cet échappement, qui a été indiqué avec de grands détails dans le corps de l'ouvrage (p. 340 et suiv., t. II). Nous nous bornerons à rappeler que chaque dent de la roue opère deux repos, l'un sur la surface extérieure, l'autre sur la surface intérieure de l'écorce, et deux levées, une sur chaque lèvre; ces deux levées réunies constituent la levée totale de l'échappement.

Dans l'échappement à cylindre, par suite de la grande étendue des repos, le travail négatif dû aux frottements a une valeur relativement importante, qui, suivant quelques auteurs, est avantageuse au point de vue de la régularisation de la force motrice. Nous croyons que c'est là une erreur. Le calcul montre, en effet, qu'une résistante constante, ou qui varie très-lentement, n'a pas d'influence sur l'isochronisme, et le frottement sur les repos, qui résulte de la force motrice, se trouve précisément varier très-lentement comme cette dernière force.

La propriété correctrice que possède l'échappement à cylindre, au point de vue de la force motrice, tient à d'autres causes et dépend essentielle-

ment des rapports établis entre les différentes parties dont il se compose.

Pour cet échappement, comme, du reste, pour tous les autres, le frottement doit donc être considéré comme un effet nuisible. C'est même à cet effet qu'il convient d'attribuer les retards progressifs que subissent les montres pourvues de cet échappement, à mesure qu'on s'éloigne davantage de l'époque d'un nettoyage. L'huile, qu'on est obligé d'introduire sur les surfaces frottantes, s'épaissit avec le temps et produit une augmentation des frottements. La force motrice transmise au rouage devenant ainsi plus faible, à mesure que la résistance éprouvée par l'échappement devient plus forte, il en résulte que les arcs de vibration doivent devenir graduellement plus petits et plus lents.

Le frottement ne pouvant avoir qu'une action nuisible, sans aucune compensation, il y a donc lieu de chercher à diminuer, le plus possible, son influence, tout en assurant aux divers organes des conditions de marche satisfaisantes.

Théorie géométrique de l'échappement à cylindre. — C'est en partant de ce point de vue, éminemment rationnel, que M. J. Wagner est arrivé à établir, pour l'échappement à cylindre, une théorie nouvelle, à laquelle nous ferons de fréquents emprunts.

Parmi les différentes conditions que doit remplir l'échappement à cylindre, l'une des plus essentielles c'est qu'on ne puisse l'arrêter à volonté, ni au doigt, ni par un mouvement brusque quelconque. Pour lui assurer cette propriété, il suffit qu'une des lèvres du cylindre soit constamment attaquée par le fuyant d'une des dents de la roue, quand le ressort spiral est dans la position où sa tension est nulle : en principe, on arrive à ce résultat en donnant au plein du cylindre la valeur d'une demi-circonférence environ et en plaçant le centre de l'échappement sur la tangente. Nous indiquerons plus loin les motifs pour lesquels il convient d'augmenter de quelques degrés cette valeur-limite du plein du cylindre.

Dans ce qui va suivre, afin de faciliter la description géométrique des organes et de faire mieux ressortir les particularités qu'ils présentent, nous supposerons, avec M. Wagner, que la roue n'ait que six dents, représentées sur la *fig.* 1 (Pl. II), qui est établie à grande échelle. Dans le même but, l'écorce est figurée sans épaisseur, de telle sorte que, dans cette disposition théorique, le vide entre deux dents est égal au plein. Nous verrons plus tard de quelle quantité ce plein doit être réduit, pour une épaisseur déterminée de l'écorce, et quel doit être le profil longitudinal du fuyant des dents ; pour le moment, nous supposerons ce profil rectiligne, comme celui de la dent A (*fig.* 1).

Dans l'hypothèse de six dents seulement à la roue et d'une écorce sans épaisseur, chaque dent correspond à un angle *nao*, égal à $\frac{360°}{2 \times 6}$ ou 30°.

Si on suppose que le point *o* soit la naissance de la dent qui doit frotter sur les parties de repos du cylindre, c'est à ce point qu'il faut mener, perpendiculairement au rayon *ao*, la tangente sur laquelle doit être placé le centre de rotation de l'échappement, afin d'obtenir le minimum de frottement.

L'autre extrémité de la dent se trouvera au point d'intersection *k* de cette tangente avec le rayon *an* prolongé.

Le cylindre étant supposé sans épaisseur, son diamètre devra être égal à la longueur de la surface frottante de la dent, et son centre d'oscillation *x* se trouvera placé au milieu de la ligne *ok*.

Le profil de la dent, le diamètre du cylindre et la tangente ne forment, comme on le voit, qu'une seule et même ligne, de direction invariable et constante, pour une roue d'un diamètre et d'un nombre de dents déterminés.

Dans ces conditions, on conserve au balancier les plus grandes oscillations possibles, sans qu'il puisse s'arrêter au doigt ou par un mouvement brusque quelconque, et l'on réduit au minimum les frottements, tant sur les pivots et la surface de l'échappement que sur les pivots et les parties frottantes des dents de la roue.

Angle de levée. — Il reste maintenant à déterminer l'angle que la dent fera parcourir au cylindre pendant la levée. Pour cela, il suffit de prolonger la circonférence de l'écorce, jusqu'à sa rencontre en *l*, avec le cercle passant par les naissances des pointes de dents, et de mener la droite *xl*, qui se trouve être tangente à ce dernier cercle. L'angle *kxl*, formé par les deux droites *xk* et *xl*, est l'angle de levée pour une roue de six dents.

On voit, d'après cela, que, pour un nombre de dents donné, cet angle de levée a une valeur déterminée, lorsqu'on s'impose, comme nous l'avons fait, la condition de la tangence. Dans ce cas, le seul moyen de faire varier cet angle, c'est de changer le nombre des dents, et il est évident que, pour une même roue, il est d'autant plus petit que ce nombre est plus grand. La *fig.* 1 (Pl. II) donne la valeur de cet angle pour les dents B, C et D, qui correspondent respectivement à la division de la même roue en huit, dix et douze dents.

Cherchons comment varie l'angle de levée avec le nombre de dents de la roue. A cet effet, menons la droite *a*F par les centres *a* et *x* de la roue et du cylindre, puis la droite *al* tangente à ce cylindre.

Les deux angles *lxk* et *lao*, ayant leurs côtés respectivement perpendiculaires, sont égaux, c'est-à-dire que l'angle de levée est égal à l'angle *lao* formé par les tangentes menées du centre *a* au cylindre, prolongé jusqu'à la rencontre du cercle qui passe par les pointes des dents. Cet angle *lao* est plus grand que l'angle *nao*, qui, pour la division de six dents, représente un douzième de la circonférence, c'est-à-dire 30°. Mais la différence,

qui est déjà très-faible pour cette division, va en diminuant avec le nombre des dents et le rayon de la roue, de telle sorte qu'elle peut être négligée pour les roues de faibles dimensions et d'un grand nombre de dents, qu'on emploie dans les montres. Par conséquent, dans le mode de tracé que nous venons d'indiquer, l'angle de levée peut s'obtenir, avec une approximation bien suffisante pour la pratique, en divisant 360° par le double du nombre de dents que porte la roue. Pour une roue de quinze dents, par exemple, il serait égal à $\frac{360}{2 \times 15} = 12°$.

Remarque. — Pour simplifier notre tracé, nous avons supposé l'écorce réduite à une simple ligne droite, et, dans cette hypothèse, nous avons trouvé que la levée partielle produite par l'incliné de la dent était de 12°, avec quinze dents, ce qui donne $12 + 12 = 24°$ pour la levée totale. Comme, en réalité, l'écorce a une certaine épaisseur, ce chiffre devrait être augmenté des portions de levées dues aux arrondis des lèvres d'entrée et de sortie. Nous nous réservons d'indiquer plus tard l'importance de ces arrondis, au point de vue de la levée; mais, tout en conservant jusque-là la valeur obtenue sans tenir compte de ces arrondis, nous devons, dès maintenant, faire remarquer que les nombreuses discussions qui se sont produites entre les horlogers, au sujet du chiffre de la levée de l'échappement à cylindre, doivent être attribuées, en grande partie, à l'absence de distinction entre les levées apparentes, partielles et totales. On ne saurait trop se mettre en garde contre cette confusion, qui ne peut qu'ajouter des complications bien inutiles aux difficultés, déjà très-réelles, que présente la détermination rationnelle des divers organes de l'échappement à cylindre.

Effet d'une augmentation de l'inclinaison du fuyant. — Avec quinze dents à la roue, certains horlogers croient devoir donner à l'échappement à cylindre une levée notablement supérieure à celle de 12°, que fournit le tracé précédent. Pour augmenter cette levée, il est indispensable d'augmenter l'inclinaison du fuyant ou d'ouvrir davantage le cylindre; mais, comme cette dernière opération a l'inconvénient de réduire l'amplitude de l'oscillation, c'est généralement à la première qu'on a recours. Toutefois, il importe, à ce sujet, de signaler une erreur, dans laquelle sont tombés la plupart des auteurs qui se sont occupés de cette question spéciale. En donnant au fuyant une inclinaison supérieure à 6° (qui correspond à la levée de 12°), on peut arriver, dans certains cas, à augmenter l'impulsion; mais cette augmentation est un fait particulier, qui tient uniquement à la grande rapidité avec laquelle s'accomplissent, dans les montres, les mouvements des différents organes. En raison de cette circonstance, il n'est pas permis de négliger, comme nous l'avons fait précédemment,

les vitesses relatives de la roue et du balancier. Au moment où le fuyant d'une des dents est en position pour commencer à agir sur une lèvre, le cylindre a acquis, par l'action du spiral, à peu près son maximum de vitesse, tandis que la roue, au même instant, ne fait que passer de l'état de repos à l'état de mouvement, et, en raison de l'inertie, des frottements, etc., elle ne peut pas prendre instantanément un excès de vitesse sur le balancier. Il en résulte que la dent ne peut atteindre la lèvre du cylindre, qui fuit devant elle, que quand cette lèvre a déjà parcouru un certain nombre de degrés. Supposons, par exemple, la lèvre atteinte, lorsqu'elle a décrit un angle de 3°; si la levée est de 12°, le plan incliné agira sur les $\frac{12-3}{12} = \frac{3}{4}$ de sa hauteur; mais si la levée n'était que de 6°, l'impulsion ne se produirait plus que sur la moitié de la hauteur de ce plan.

On comprend qu'il soit très-difficile de déterminer exactement à quel point commence le contact du fuyant et de la lèvre, puisque la vitesse de la roue dépend d'un grand nombre d'éléments, de la force motrice qui lui est appliquée, de son moment d'inertie, de la valeur des frottements, etc. Tout ce qu'on peut dire, d'une manière générale, c'est que le retard sera d'autant moins prononcé que la force motrice sera plus forte, la roue plus légère et les frottements plus faibles. La forme donnée au fuyant a également, à ce point de vue, comme nous le verrons, une certaine importance.

Inclinaison du fuyant. — Quelque incomplètes que soient ces observations, elles suffisent cependant pour montrer quel est le genre d'influence de l'inclinaison du fuyant sur l'impulsion. — Si cette impulsion augmente avec l'inclinaison du plan, c'est uniquement, en réalité, parce que, grâce à cette inclinaison, le contact a lieu pendant une durée plus considérable. Mais si cette durée était la même pour deux fuyants d'inclinaisons différentes et de même longueur de base, si, par exemple, ces fuyants étaient en contact avec la lèvre sur la même fraction de leur étendue, l'impulsion, en négligeant les frottements, serait exactement la même pour tous les deux, et, en tenant compte de ces frottements, elle serait plus forte pour le fuyant le moins incliné.

Définition de l'impulsion. — Pour le démontrer, remarquons d'abord que l'impulsion n'est pas, comme le supposent certains horlogers, un effort transmis, mais bien le produit d'un effort par la projection, sur la direction de cet effort, du chemin parcouru par son point d'application, c'est-à-dire ce qu'on appelle, en mécanique, un *travail.* Dans le cas où l'effort est variable, du commencement à la fin du mouvement considéré, l'impulsion est la somme des divers travaux partiels obtenus, en divisant la durée totale de l'action en intervalles assez petits pour que, dans chacun d'eux, l'effort puisse être considéré comme constant.

Or ici, le travail transmis à la lèvre par un plan incliné quelconque n'est autre chose que le travail de la force motrice agissant tangentiellement à la roue, pendant que cette roue décrit un arc précisément égal à la base du plan incliné. De là résulte que le travail transmis (ou l'impulsion) est le même pour tous les plans inclinés de même base, quelles que soient d'ailleurs leurs hauteurs.

Comme vérification, on peut remarquer que, si l'on augmente la hauteur d'un plan incliné, si on la double, par exemple, le chemin parcouru devient deux fois plus considérable ; mais, par contre, l'effort transmis devient moitié moindre, de telle sorte que le produit de ces deux éléments reste le même ; or ce produit, c'est précisément l'impulsion.

Si l'on veut tenir compte des frottements, il est facile de voir que, plus on augmente la hauteur du plan incliné, plus le fuyant devient long et, par conséquent, plus le travail du frottement sur ce fuyant, pendant la levée, est considérable. Comme le diamètre du cylindre augmente en même temps que la longueur du fuyant, le travail du frottement sur les repos se trouve également augmenté.

Enfin, si l'on veut conserver au cylindre une ouverture voisine de 180°, afin de permettre au balancier les plus grandes vibrations possibles, il importe de placer son centre d'oscillation au milieu du fuyant droit de la dent ; mais alors ce centre se trouve en dehors de la tangente, ce qui tend encore à produire une augmentation de frottement assez sensible.

Inconvénients d'une levée trop faible ou trop grande. — Les considérations précédentes montrent qu'il y aurait des inconvénients sérieux à adopter une levée trop faible, puisque l'impulsion communiquée pourrait se trouver notablement réduite par suite de l'absence de contact d'une partie du fuyant avec les lèvres et qu'en outre, il se produirait un petit choc au moment où commencerait ce contact.

D'un autre côté, une levée trop forte n'est pas moins à éviter, en raison de l'augmentation des frottements, qui en est forcément la conséquence.

Il résulte de là que si, pour une montre dont tous les organes seraient fixés, à l'exception du fuyant des dents, on imagine qu'on fasse varier progressivement la hauteur de ce fuyant, à partir de zéro, l'impulsion sera d'abord nulle, jusqu'à ce qu'on arrive à une certaine hauteur ; elle ira ensuite en augmentant, à mesure que le contact aura lieu sur une plus grande fraction de la longueur du plan incliné, et finira par atteindre son maximum, lorsque cette fraction deviendra égale à l'unité, c'est-à-dire lorsque l'inclinaison sera telle que le contact ait lieu sur toute la longueur (*). Si l'on continue à augmenter l'inclinaison, le contact aura bien

(*) Rigoureusement, le maximum de l'impulsion doit correspondre à une inclinaison intermédiaire entre celle qui correspond au contact sur toute l'étendue du fuyant et celle que

encore lieu sur toute l'étendue du fuyant, mais l'impulsion ira en diminuant, par suite de l'augmentation progressive du travail des frottements.

Si le plan limite, dont il vient d'être question, pouvait être facilement déterminé, c'est évidemment celui qui fournirait les conditions de marche les plus avantageuses. Mais les différentes actions que comporte la levée d'un échappement sont trop complexes pour que cette détermination puisse être tentée par le calcul. Du reste, lors même qu'on serait parvenu à établir une formule donnant la hauteur du plan incliné en fonction des autres éléments de l'échappement, on ne serait pas beaucoup plus avancé, car cette formule renfermerait nécessairement certains coefficients, dont les valeurs sont imparfaitement connues ou même variables, suivant les circonstances, entre des limites assez éloignées; c'est ce qui aurait lieu, en particulier, pour les coefficients de frottements. On ne peut donc guère recourir ici qu'à une détermination expérimentale, en partant des considérations que nous venons d'exposer.

Le plan cherché doit correspondre au maximum d'impulsion, c'est-à-dire que, jusqu'à ce qu'on soit arrivé à ce plan, l'impulsion doit aller constamment en augmentant, pour décroître ensuite, lorsqu'il est dépassé. Or, l'oscillation complète d'un balancier se compose de l'arc de levée totale et de l'arc supplémentaire.

L'arc supplémentaire dépend essentiellement de l'impulsion, toutes choses égales d'ailleurs. Comme l'impulsion va en croissant, depuis le plan où il commence à y avoir un contact avec les lèvres jusqu'au plan limite, il en résulte que l'arc supplémentaire doit lui-même aller en augmentant avec la levée jusqu'à cette même limite. Au delà, l'impulsion diminuant, par suite des frottements, l'arc supplémentaire doit lui-même diminuer, à mesure que la levée augmente. Le plan limite correspond donc également au plus grand arc supplémentaire et, par suite, au réglage le mieux assuré.

On peut déduire de là un moyen de déterminer expérimentalement ce plan limite. Il suffit, pour cela, en conservant une force motrice constante, d'essayer successivement une série de roues de cylindre avec des dents d'inclinaisons différentes, de mesurer, pour chacune d'elles, l'arc d'oscillation total et d'en retrancher la levée totale; la différence donnera l'arc supplémentaire.

L'incliné correspondant à la plus grande de ces différences sera évidemment celui qui se rapprochera le plus de l'incliné limite.

---

donne le tracé de l'échappement tangent. Lorsqu'on dépasse, en effet, cette dernière inclinaison, les frottements deviennent plus considérables, et le maximum théorique a évidemment lieu lorsqu'on arrive à perdre, par cette augmentation des frottements, tout ce qu'on gagne par un contact sur une plus grande longueur. Sous le bénéfice de cette observation, on peut, pour simplifier le raisonnement, conserver le plan limite indiqué dans le texte.

Avec une série de roues, présentant des inclinaisons successivement croissantes de 2 à 3°, on arrivera ainsi, pour un type de montre donné, à déterminer l'élément en question avec une approximation bien suffisante. Il va sans dire que, pour qu'on puisse compter sur le résultat obtenu, il est essentiel que les expériences soient faites, pour toutes les roues, dans des conditions aussi identiques que possible et avec une force motrice rigoureusement la même pour toutes.

Forme des fuyants. — Il nous reste maintenant à étudier quelle est la forme la plus convenable à donner à la surface frottante des dents de la roue d'échappement,

Cette question, comme celle de la levée, a soulevé de nombreuses discussions, et, malgré les travaux auxquels elle a donné lieu, depuis plus de soixante ans, elle n'est pas encore complétement résolue. Si l'on examine, en effet, les différentes formes en usage aujourd'hui, pour l'incliné des dents, on peut constater qu'il existe, à ce sujet, des opinions non-seulement divergentes, mais encore contradictoires. C'est ainsi, par exemple, que certains artistes préconisent la forme droite ou rectiligne, d'autres une surface creuse ou concave, d'autres enfin une surface convexe, d'une courbure plus ou moins prononcée.

Fuyant droit ou rectiligne. — Nous allons examiner successivement ces différentes formes, en commençant par celle qu'on désigne sous le nom de fuyant droit.

D'après ses partisans, les propriétés du fuyant droit seraient :

1° D'engendrer moins de frottement que tous les autres, parce que sa longueur est plus faible;

2° De donner en tous ses points une décomposition des efforts uniforme ;

3° D'éprouver, de la part du balancier, une résistance constamment la même ;

4° D'absorber moins de force motrice.

Mais il est facile de montrer que toutes ces prétendues propriétés sont en contradiction formelle avec les principes fondamentaux de la mécanique. L'erreur, dans laquelle sont tombés à ce sujet certains auteurs, provient de ce qu'ils ont confondu involontairement deux choses essentiellement différentes, *la force* et *le travail*. Ainsi que nous l'avons déjà fait remarquer, la mesure de l'effet d'une force est le travail, c'est-à-dire le produit de cette force par la projection, sur sa direction, du chemin parcouru; l'un des termes de ce produit, le chemin, par exemple, peut augmenter, bien que le produit lui-même diminue; il suffit évidemment, pour cela, que l'autre terme éprouve une diminution plus rapide.

Cette remarque faite, revenons aux propriétés attribuées au plan

droit, en commençant par la seconde; pour que l'effort transmis au balancier fût constant, en tous les points de la levée, il faudrait que la vitesse de rotation du cylindre fût proportionnelle à celle de la dent: or il n'en est rien.

Prenons, en effet, la dent F (*fig.* 2, Pl. II), dont le fuyant est rectiligne, et divisons le parcours de cette dent en parties égales, six par exemple, au moyen de rayons passant par les points 1, 2, 3...; partageons en six parties égales l'arc correspondant à la levée et, par les points de division ainsi obtenus, *a*, *b*, *c*,... décrivons des arcs de cercle, concentriques au cercle de la roue.

La figure, ainsi tracée, montre que lorsque la dent F aura parcouru les deux sixièmes de sa course, c'est-à-dire lorsque le point *r* sera venu en *s*, le cylindre aura tourné d'une quantité inférieure au sixième de sa levée. Si l'échappement est rigoureusement à la tangente, cette quantité n'est que le neuvième de la levée, c'est-à-dire que, dans ce cas, le parcours du cylindre n'est que le tiers de ce qu'il serait, si sa vitesse était uniforme. Pendant le parcours du dernier sixième de la dent, le cylindre décrit, au contraire, les deux sixièmes environ de sa levée, c'est-à-dire que sa vitesse est le double de la vitesse moyenne. Les vitesses du cylindre, au commencement et à la fin de la levée, se trouvent donc avoir des valeurs très-différentes, dans le rapport de 1 à 6 environ.

Si le mouvement de la roue d'échappement pouvait être considéré comme un mouvement uniforme (ce qui n'est pas rigoureusement exact), il en résulterait qu'il y aurait équilibre entre l'action que cette roue reçoit du moteur et la résistance qu'elle éprouve de la part du balancier, et, comme l'action du moteur est uniforme et constante, le travail transmis au cylindre aurait aussi une valeur constante, pour chaque fraction de tour de la roue. Dans ces conditions, le chemin parcouru par le cylindre, pour chaque sixième de tour de cette roue, allant en augmentant, du commencement à la fin de la levée, l'effort transmis, qui est l'autre facteur du travail, devrait varier en sens inverse, c'est-à-dire que, abstraction faite des frottements, cet effort devrait être théoriquement six fois plus considérable au commencement qu'à la fin de la levée.

En réalité, le mouvement de la roue d'échappement n'est pas uniforme, et les chiffres que nous venons de donner ne doivent être considérés que comme une approximation. Toutefois, le raisonnement précédent suffit pour montrer qu'avec le plan droit, l'effort transmis au cylindre est bien loin d'être constant en tous les points de la levée.

Parmi les causes, qui tendent à faire varier la résistance opposée par le balancier à la roue d'échappement, figure en premier lieu l'action du spiral. Au début, ce ressort, en vertu de son élasticité, a une tendance à continuer son mouvement, de telle sorte qu'il commence à entraîner le balancier; mais, dès que ce balancier, par l'effet de l'impulsion, tend à

prendre un excès de vitesse sur le spiral, il l'entraîne, et la résistance qu'il oppose à la roue augmente.

Ainsi, au début de la levée, le cylindre n'oppose à la roue qu'une faible résistance ou même n'en oppose pas du tout, de telle sorte que la roue se trouvant soumise à l'action d'une force motrice constante, prend un mouvement accéléré, vient agir sur le balancier avec un petit choc et lui communique une quantité de mouvement d'autant plus forte que ce balancier offre moins de résistance (ce qui tend à augmenter l'amplitude de l'oscillation) ; puis, à partir du moment où le balancier tend à entraîner le spiral, le travail de la résistance, que doit vaincre le travail moteur reçu par la roue, va progressivement en augmentant, de telle sorte que le mouvement de la roue se ralentit ; ce ralentissement est avantageux en ce sens que la roue n'ayant plus qu'une vitesse modérée, lorsqu'elle tombe au repos, le choc qui se produit n'est pas trop prononcé.

De ce que la pression exercée par la roue sur le cylindre est très-variable aux différents points de la levée, il résulte, comme il serait facile de le démontrer, que l'action du frottement, avec le plan droit, est plus considérable qu'avec le fuyant convexe, dans lequel la pression peut être considérée comme uniforme, du commencement à la fin de la levée.

Fuyant concave. — Des considérations analogues à celles que nous venons de développer montrent qu'avec une courbe concave, les inconvénients, signalés pour le plan droit, se trouveraient encore exagérés, et il nous paraît, dès lors, inutile d'insister sur une forme qui présente une infériorité évidente et qui, du reste, a été partout abandonnée.

Fuyant convexe. — Parmi les diverses courbes convexes qui ont été proposées pour le fuyant, il en est une qui jouit de cette propriété que le mouvement angulaire de la roue se trouve répondre sensiblement au mouvement angulaire du cylindre, ou, en d'autres termes, que la vitesse de la roue, en tous les points de la levée, est sensiblement proportionnelle à celle du cylindre.

Cette courbe F′ (*fig.* 2, Pl. II) est un arc de cercle, d'un rayon égal à celui de la roue. Pour déterminer son centre p'', des deux extrémités o et p de la dent, il suffit de décrire, avec le rayon de la roue, deux arcs de cercle et de prendre leur point d'intersection, qui se trouve naturellement sur la perpendiculaire à op, menée par le milieu de cette ligne. Si l'on prend pour profil longitudinal de la dent l'arc otp, décrit de ce centre p'', avec le rayon de la roue, et si l'on répète le mode de division précédemment indiqué pour la dent F, il est facile de vérifier, sur la figure, que cette courbe fera parcourir au cylindre des arcs sensiblement proportionnels à ceux de la dent, c'est-à-dire que, quand celle-ci se sera déplacée de 1, 2, 3... sixièmes de son parcours angulaire, le cylindre aura décrit, dans le

même temps, 1, 2, 3... sixièmes de sa levée. Il ne faut, d'ailleurs, pas perdre de vue que cette propriété de l'arc de cercle, d'un rayon égal à celui de la roue, n'existe qu'avec l'échappement tracé à la tangente; si la ligne *op* avait une inclinaison différente de celle de la tangente à la roue, le rayon de l'arc *otp* devrait être modifié.

Si la résistance opposée par le cylindre pouvait être supposée la même en tous les points de la levée, cette courbe correspondrait à une pression à peu près uniforme. En réalité, il n'en est pas tout à fait ainsi, par suite de la résistance croissante qu'oppose le spiral, à mesure qu'il est plus tendu, de sorte que la résistance que doit vaincre la force motrice, par l'intermédiaire du fuyant de la roue, est plus forte à la fin de la levée qu'au début. Cette augmentation de résistance, qui est d'ailleurs plus faible qu'avec le plan droit, est avantageuse au point de vue du mouvement de la roue elle-même, qui, dans l'hypothèse d'une résistance constante, tendrait à prendre un mouvement de plus en plus accéléré et viendrait, par suite, tomber au repos avec un choc assez violent.

On comprend, sans qu'il soit nécessaire d'insister plus longuement, qu'avec des proportions convenablement établies entre le spiral, le balancier, la force motrice et la levée, il soit possible d'arriver à ce que la roue, à la fin de son parcours, soit animée d'un mouvement de rotation sensiblement uniforme, ou même uniformément retardé, ce qui serait encore préférable au point de vue de la chute.

Des considérations précédentes il résulte qu'avec le fuyant convexe, tel que nous l'avons tracé, la résistance que doit vaincre la roue variera entre des limites beaucoup moins éloignées qu'avec l'incliné droit et que, le maximum de valeur de cette résistance étant plus faible, on pourra se contenter, pour la roue, d'une force motrice moindre. Comme les frottements sont proportionnels aux pressions, ils seront également plus faibles, et, comme le chemin parcouru est, à un infiniment petit près, le même qu'avec le plan droit, le travail négatif de ces frottements, pendant le mouvement de la roue, aussi bien que pendant les repos, aura naturellement une valeur moindre; en outre, il sera réparti beaucoup plus uniformément. C'est là le principal avantage de l'incliné courbe, établi comme nous l'avons indiqué.

Nous devons ajouter qu'avec cette forme convexe, la levée peut être plus faible qu'avec l'incliné droit. Si l'on considère, en effet (*fig.* 7), deux dents de même levée, l'une à profil rectiligne, l'autre à profil courbe, la première ne sera autre chose que la corde de la seconde, et la figure montre que l'angle décrit par la roue, depuis l'origine du mouvement jusqu'au moment du contact de la dent et de la lèvre, sera plus faible pour le profil courbe que pour l'autre; si le contact, pour ce dernier, ne commence qu'en A, il aura lieu en A′ sur la courbe; la partie non utilisée du fuyant sera, par suite, plus faible. Or, nous avons vu précédemment

qu'une des raisons, pour lesquelles il y avait lieu de ne pas trop réduire la levée, avec le plan droit, était précisément cette absence de contact à l'origine, qui prenait d'autant plus d'importance que la levée était plus faible.

Fig. 7.

Fuyant convexe à forte courbure.— Certains artistes, en modifiant la courbure du profil précédent, se sont proposé d'obtenir un fuyant qui jouisse de la propriété de corriger les variations de résistance dues au spiral et de faire disparaître le petit choc qui se produit, au moment du contact de la dent et de la lèvre du cylindre, après le parcours à vide.

Jodin, après avoir essayé une courbe de cette nature, y a renoncé, à la suite des résultats défavorables qu'il avait obtenus dans les montres auxquelles il l'avait appliquée. La question a été reprise depuis par M. Wagner. D'après cet habile artiste, pour corriger le retard dû à l'inertie, il convient de donner à la courbe une forme telle qu'elle permette à la dent de suivre, dans sa marche et pendant toute la levée, la surface de la lèvre du cylindre. Comme la vitesse de la roue part de zéro pour aller ensuite en augmentant progressivement, il faut donner à la pointe de cette dent un angle très-ouvert et faire décroître ensuite la courbure jusqu'à la fin, pour que la dent transmette au cylindre un effort de plus en plus grand, proportionnel à la résistance du ressort spiral, laquelle, comme nous l'avons dit, augmente depuis le point où ce spiral est entraîné par le balancier jusqu'à la fin de la levée.

M. Wagner fait remarquer que la détermination mathématique d'une telle courbe serait très-difficile et même impossible, attendu que, parmi le grand nombre d'éléments dont il faudrait tenir compte, il s'en trouve de très-variables, comme, par exemple, la vitesse acquise du balancier en chaque point de son parcours. Pour ce motif, il s'est borné à conseiller l'emploi d'une courbe facile à tracer et répondant approximativement au but qu'il s'était proposé.

Cette courbe, qui se trace au moyen de deux centres seulement, est représentée en F″ (*fig.* 2, Pl. II). Pour l'obtenir, M. Wagner divise en six parties égales le parcours de la dent et celui du cylindre, pendant la durée de la levée, puis du centre *q*, déterminé comme le centre *p*″ de la dent F′ (même figure), et avec le rayon de la roue, il trace un premier arc de cercle *jv*, passant par l'extrémité *j* de la dent et s'arrêtant au point d'intersection *v* avec l'arc de cercle mené par le point de division *b*. Sur le milieu de la ligne *vo*, il élève ensuite une perpendiculaire qui, par son intersection avec le rayon *qv*, fournit le second centre *u*; l'arc décrit de ce point, avec *uv* pour rayon, complète le profil cherché.

Avec cette forme de dent, lorsque le cylindre a déjà parcouru un

sixième de sa levée, l'angle dont la roue a tourné n'est que 1/18 environ de sa course; sa marche est donc relativement beaucoup plus lente; vers le milieu de la levée, elle est sensiblement la même, et à la fin elle est plus rapide. La pression exercée sur la lèvre est donc de plus en plus forte, à mesure qu'on se rapproche de la fin de la levée, ce qui tend à compenser la résistance croissante du spiral. Mais il ne faut pas perdre de vue que le mouvement accéléré de la roue, vers la fin de sa course, se traduit nécessairement par un choc assez violent sur le repos. C'est là un inconvénient très-sérieux du fuyant à courbure prononcée. Comme ses avantages, par rapport au fuyant à courbure plus faible, sont d'ailleurs assez contestables, nous ne pensons pas qu'il y ait lieu d'en recommander l'emploi.

Résumé et conclusions. — De tout ce qui précède, il résulte qu'avec l'incliné droit la chute est plus faible qu'avec l'incliné courbe, mais la pression sur les lèvres et les repos plus énergique. L'incliné droit nécessite donc, en principe, une force motrice plus considérable et donne lieu à une usure des lèvres plus rapide; son seul avantage est de pouvoir donner des arcs supplémentaires un peu plus étendus.

Avec l'incliné courbe, formé d'un arc de cercle de même rayon que la roue, la conservation des lèvres est mieux assurée, car le frottement est plus faible et plus uniformément réparti sur la longueur de la surface de contact pendant la levée. La force motrice nécessaire est plus faible.

Du reste, cette question de la courbure est, en réalité, assez secondaire par rapport à celle de la levée, et nous sommes assez disposé à penser que les expérimentateurs n'ont pas suffisamment tenu compte de ce dernier élément dans l'appréciation des différences d'effets obtenues avec les diverses formes de fuyants. Il est évident que cette comparaison ne peut être sérieuse qu'à la condition de porter sur des inclinés de forme différente, mais de même levée totale; or, à notre connaissance, c'est ce qui n'a jamais été fait.

En l'absence de résultats d'expérience obtenus dans des conditions satisfaisantes, il paraît convenable de s'en tenir aux conclusions de la théorie et d'admettre, par suite, pour l'incliné, une courbe à faible courbure, telle qu'un arc de cercle décrit avec un rayon sensiblement égal à celui de la roue.

Observations sur la valeur des flèches de courbure.—Dans les différentes figures qui nous ont servi pour l'étude de l'échappement à cylindre, nous avons dû, comme on est obligé de le faire pour tous les organes de montres, adopter une échelle très-amplifiée, qui ne permet guère de se rendre compte des différences réelles entre les divers fuyants examinés. Mais il est facile d'obtenir ces résultats par le calcul. Prenons, par exemple, une roue de montre, ayant 12 millimètres de diamètre, portant quinze dents,

et cherchons à nous rendre compte de la différence des fuyants droit et courbe sur ces dents, ce dernier étant tracé avec le rayon de la roue. En premier lieu, pour ce qui concerne la flèche, c'est-à-dire le plus grand écartement entre la droite et l'arc de cercle, un calcul très-simple, dont il est inutile de reproduire les détails, montre que cette flèche n'est que $\frac{1}{200}$ du rayon de la roue, soit à peine $\frac{1}{30}$ de millimètre; quant à la différence de longueur entre les deux fuyants, qui n'est autre chose que la différence entre l'arc et sa corde, on trouve qu'elle est, dans les mêmes conditions, de $\frac{1}{400}$ de millimètre. Il faut avouer que de pareilles différences, qui, par leur ordre de grandeur, rentrent presque dans les erreurs d'exécution, ne paraissent guère de nature à produire de grands écarts dans la marche des pièces, toutes les autres conditions étant d'ailleurs supposées rester les mêmes.

Une autre cause vient encore diminuer la différence que nous venons de constater entre les formes théoriques des inclinés droit et courbe. Dans les roues à incliné droit, les pointes des dents ne sont jamais aiguës; elles sont toujours terminées par un petit arc de cercle, dont le rayon est d'autant plus grand, relativement à la longueur du plan incliné, que l'échappement est plus petit. Nous avons dit précédemment que, en raison de l'inertie, le départ de la roue n'était pas instantané et que, le cylindre ayant une très-grande vitesse, la dent parcourait un certain espace à vide, avant d'atteindre le cylindre. Supposons que le chemin décrit par ce cylindre, avant le contact, soit égal, par exemple, à un dixième de la hauteur de l'incliné: si la dent était rigoureusement aiguë, le premier contact n'aurait lieu qu'à une certaine distance de l'origine, tandis qu'il pourra avoir lieu à cette origine même, si l'arrondi se trouve être sensiblement égal à la partie de la levée décrite à vide par le cylindre, dans l'hypothèse d'une dent à pointe aiguë.

Cet arrondi existe aussi bien avec l'incliné droit qu'avec le fuyant convexe; il est même, comme nous allons le voir, une conséquence du mode d'exécution des roues d'échappement à cylindre.

Dans tout ce qui précède, pour simplifier les démonstrations, nous avons supposé le cylindre sans épaisseur; pour rentrer maintenant dans la réalité, il nous reste à indiquer comment on prépare les dents destinées à agir sur un cylindre d'épaisseur déterminée. A cet effet, on ouvre sur la machine à fendre l'intervalle des dents, au moyen d'une fraise, d'une épaisseur égale à celle de l'écorce, en répétant cette division un nombre de fois double de celui des dents de la roue. Cette opération, qui détermine immédiatement le vide et le plein nécessaires, donne, en même temps, des extrémités de dents moins aiguës, moins fragiles et mieux disposées pour les frottements sur l'écorce.

Les dents G, G (*fig.* 1, Pl. II) sont représentées avec cet arrondi et la courbe convexe précédemment indiquée.

D'après ce que nous avons dit, cette petite partie retranchée à l'extrémité de la dent ne produit pratiquement aucune réduction de la levée.

De la chute. — Ainsi que nous l'avons déjà souvent fait remarquer, les chocs, en dehors de l'ébranlement qu'ils produisent, sont encore une cause d'usure et de perte de force; c'est ce qui explique la grande influence des chutes sur l'étendue des vibrations et, par suite, la difficulté incontestable d'obtenir un réglage constant d'un échappement, lorsque les chutes atteignent une certaine intensité.

Dans un échappement à cylindre, la chute, sur la surface extérieure, a plus d'influence sur la marche que la chute intérieure, d'abord parce qu'elle agit avec un bras de levier un peu plus long et, en second lieu, parce qu'elle correspond à un frottement dit rentrant, lorsque l'échappement n'est pas à la tangente. C'est donc encore un motif pour ne pas trop s'écarter de la tangente, lorsqu'on croit devoir le faire pour obtenir des vibrations d'une plus grande étendue. Dans tous les cas, on doit chercher à éviter toute chute autre que celle qui est rigoureusement nécessaire à la sûreté des fonctions et, à cet effet, il est indispensable que le centre du cylindre coïncide toujours rigoureusement avec le milieu de la corde de l'incliné.

De la hauteur du plan incliné et de la levée. — La levée totale d'un échappement à cylindre est mesurée, comme nous l'avons déjà dit, par l'espace angulaire total que décrit le cylindre, pendant l'action de la dent sur les deux lèvres. La levée partielle, pour une seule lèvre, comprend le déplacement dû à la hauteur du plan incliné, augmenté de celui qui provient de l'arrondi de cette lèvre. En laissant de côté, pour le moment, cette dernière quantité, on peut dire que la levée partielle, pour une lèvre, est mesurée par la hauteur du fuyant, ou encore par l'angle que forme la base de la dent avec le fuyant lui-même, lorsqu'il est droit, ou avec la corde de son arc, lorsqu'il est courbe.

Cet angle présente de très-grandes variations suivant les auteurs. Ainsi, pour une roue de quinze dents, d'après Berthoud, Moinet, etc., il devrait être de 10° environ, et, d'après Tavan, de 12°, tandis que M. Wagner recommande de le prendre égal à 6°.

L'angle à la base de la dent représente, comme nous l'avons démontré (page 31), la moitié de la levée d'un côté ou le quart de la partie de la levée totale, due à la hauteur du fuyant, de telle sorte que les données précédentes se trouvent correspondre à des levées de 40°, 48° et 24°. A ces derniers chiffres il convient d'ajouter les degrés provenant de l'arrondi de la lèvre d'entrée et de l'incliné de la lèvre de sortie, qu'on peut évaluer, en moyenne, à cinq ou six. Les levées totales réelles seraient, par conséquent, de 46°, 54° et 30°.

Le dernier de ces nombres, qui correspond à l'échappement tangent, présente, comme nous l'avons vu, les conditions les plus favorables au point de vue théorique; les frottements sont réduits au minimum et l'impulsion transmise au balancier serait la même qu'avec une levée plus forte, si le contact commençait rigoureusement à l'origine de la dent; mais comme, en raison de la vitesse acquise du balancier, ce contact peut n'avoir lieu qu'à une certaine distance, on comprend qu'il puisse y avoir pratiquement un certain avantage, au point de vue de l'étendue des oscillations, à forcer un peu le chiffre de la levée.

Remarquons, d'ailleurs, que les propriétés de l'échappement tangent ne se trouvent pas très-notablement modifiées, lorsqu'au lieu de la tangente à la roue, on prend, pour la corde du fuyant, une droite qui ne s'en écarte pas trop, c'est-à-dire qui ne fasse pas avec cette tangente un angle supérieur à 3 ou 4°.

On peut conclure de là que l'angle théorique de 6° pourrait, dans certains cas, être porté à 9 ou 10°, sans qu'on ait à redouter une augmentation notable des frottements, à la condition, toutefois, qu'on ait soin de faire coïncider rigoureusement le centre du cylindre avec le milieu de la corde de l'incliné.

De diverses causes qui influent sur la hauteur de l'incliné. — L'étendue des mouvements du balancier, toutes choses égales d'ailleurs, dépend essentiellement du rapport existant entre le travail positif que lui transmet la force motrice, pendant la levée, et le travail négatif, dû à cette même force, pendant les repos. Le premier travail tend à accélérer le mouvement du balancier et le second, au contraire, à le ralentir. En principe, l'excédant du premier sur le second doit être juste suffisant pour compenser les petites pertes qu'éprouve le balancier, par suite des frottements, de la résistance de l'air, etc. — Si donc on suppose que, pour une force motrice donnée, il existe un rapport convenable entre ces deux travaux, ce rapport devrait évidemment être modifié dans le cas où la force motrice viendrait à éprouver une variation notable.

Une conclusion toute naturelle à tirer de là, c'est que, dans la détermination de la hauteur du fuyant des dents, il convient de tenir compte de la force motrice dont on dispose à la circonférence de la roue d'échappement.

D'un autre côté, toutes proportions gardées, la hauteur de l'incliné doit être plus considérable pour une petite montre que pour une grande. Les petits balanciers ont, en effet, un mouvement angulaire plus rapide que les grands et, par conséquent, ils doivent se dérober plus promptement à l'attouchement de la roue, c'est-à-dire que le contact tend à commencer à une plus grande distance de l'origine de la dent. Si donc on conserve le même nombre de dents pour cette roue, il est nécessaire

d'augmenter la hauteur de l'incliné de chacune d'elles. On peut, d'après cela, poser en principe que la hauteur de l'incliné doit varier en raison inverse de la grandeur des montres.

En partant de l'examen d'un grand nombre de montres, reconnues d'une marche satisfaisante et pour lesquelles on a relevé le nombre de vibrations par heure et les levées réelles et apparentes, on a pu dresser le tableau suivant, dont les valeurs peuvent être regardées comme convenables pour les montres de différentes grandeurs. Dans ce tableau, la levée réelle totale (la seule qu'on devrait considérer) est la somme des levées produites sur les deux lèvres par l'incliné de la dent et de celles qui sont dues à l'arrondi et à l'incliné des lèvres elles-mêmes. La levée partielle à l'entrée est un peu plus faible que la levée à la sortie, car l'arrondi du cylindre produit un peu moins d'effet que la courbe inclinée qui le termine de l'autre côté; toutefois, comme la différence est faible, nous la négligerons, c'est-à-dire que nous supposerons les deux levées partielles égales. Quant à la levée apparente, c'est, comme on le sait, l'arc de cercle compris entre les deux points qui, sur la platine, correspondent à la fin des deux demi-levées. Comme chaque demi-levée réelle peut commencer plusieurs degrés avant le point milieu marqué sur la platine, il en résulte que la levée apparente est toujours plus faible que la levée réelle.

	PETITES MONTRES.	MONTRES MOYENNES.	GRANDES MONTRES.
Nombre de vibrations du balancier par heure.	19.000	18 000	17 000 à 16.000
Levée réelle d'un côté..	26°	22°	18°
Levée réelle totale.	52°	44°	36°
Levée apparente.	44°	36°	30°

Ces nombres, comme on doit le comprendre, n'ont rien d'absolu et sont simplement donnés à titre d'indications. Il est évident, d'après ce que nous avons dit, que la levée peut être d'autant plus réduite que l'exécution des pièces est plus soignée. Ainsi, par exemple, avec un cylindre et des inclinés mal polis, les frottements sont naturellement plus considérables, et il est indispensable que l'incliné ne soit pas trop bas, afin que l'excès du travail positif, transmis au balancier, sur le travail négatif des frottements des dents et des repos soit suffisant pour réparer les petites pertes du balancier à chaque vibration. Avec des pièces parfaitement exécutées, on pourrait certainement réduire les levées du tableau de quelques degrés.

De l'ouverture du cylindre et de la forme des lèvres. — D'après Moinet (p. 354, t. II), le plein laissé au cylindre doit être de 190° environ; d'après

M. Wagner, 185° sont suffisants; d'autres artistes, au contraire, sont allés à 200° et au delà. Il y a donc une divergence assez prononcée sur ce point, comme d'ailleurs sur presque toutes les questions que soulève l'exécution de ce genre d'échappement.

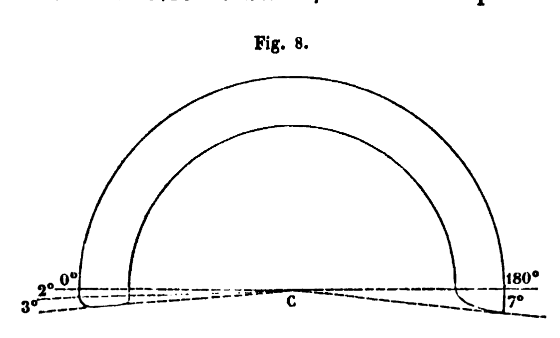
Avec un cylindre profondément entaillé, ou, comme on dit, *très-ouvert*, la vibration du balancier est un peu plus courte, tandis qu'avec un cylindre *très-fermé*, les frottements sur les repos étant plus étendus, l'échappement tend à s'engourdir plus facilement par l'épaississement de l'huile. Il convient donc d'éviter également les deux extrêmes et de se tenir à une valeur moyenne. Remarquons toutefois qu'ici encore le degré de perfection de l'exécution doit nécessairement être pris en considération : avec des surfaces imparfaitement polies, le frottement sur les repos est considérable et il y a grand avantage à le réduire le plus possible, tandis qu'avec des pièces soignées, ce frottement perd beaucoup de son importance. Il résulte de là que, d'une manière générale, le plein laissé au cylindre devra être d'autant plus faible que la fabrication sera plus imparfaite et que la valeur moyenne, indiquée ci-après, devra être légèrement augmentée ou diminuée, suivant le plus ou moins de perfection de l'exécution.

Pour arriver à la fixation de la valeur moyenne du plein du cylindre, il convient d'abord de déterminer la forme à donner aux lèvres, pour diminuer l'usure le plus possible et rendre la vibration plus facile, en réduisant au minimum la chute de repos.

Dans ce but, la lèvre d'entrée (*fig.* 8) doit être formée d'une ligne droite terminée par deux arrondis, celui de l'extérieur étant assez prononcé, pour dégager plus vite la dent et adoucir le choc d'entrée, tandis que l'autre doit être plus faible, de manière à n'avoir que la chute absolument nécessaire; le premier arrondi doit correspondre à 3° environ.

Pour la lèvre de sortie, la forme la plus satisfaisante est donnée par une courbe allongée et aplatie, de telle sorte que le contact avec la dent se produise près de son extrémité, ce qui a pour effet de diminuer un peu la chute et d'augmenter légèrement l'impulsion, puisque l'effort transmis par la roue agit alors sur le plus grand rayon, celui de la surface extérieure du cylindre. Cette courbe aplatie doit occuper un arc de 7 à 8°.

Fig. 8.



Il nous est facile maintenant de déterminer l'ouverture à donner au cylindre. La corde de l'incliné de la dent passant par le centre du cy-

lindre, nous avons déjà un plein égal à la demi-circonférence, c'est-à-dire 180°, auxquels il convient d'ajouter 2°, pour la sûreté des fonctions ; avec 3° d'arrondi de la lèvre d'entrée, 7° de l'incliné de la lèvre de sortie, on arrive, en définitive, à un plein de 192°.

Avec ces dimensions, la levée totale, donnée par la double hauteur de l'incliné de la dent, se trouve augmentée de $3° + 7° = 10°$; mais comme, d'un autre côté, elle se trouve diminuée par l'arrondi de la pointe de la dent, cette augmentation ne peut guère être évaluée qu'à 5 ou 6° au plus.

Nous devons, en terminant, répéter une remarque que nous avons déjà faite, relativement à la petitesse des pièces dont il s'agit, et qui peut expliquer, dans une certaine mesure, les divergences entre les nombres adoptés dans les différentes fabriques. Avec des cylindres, dont le diamètre extérieur varie, en général, de 1 millimètre à $1^{mm},5$, 1° correspond à moins de 1/100 de millimètre de longueur sur la circonférence. On comprend, d'après cela, qu'on puisse facilement commettre, en exécution, des erreurs s'élevant jusqu'à 2 ou 3°.

ÉCHAPPEMENTS LIBRES.

Considérations générales. — Sous le nom générique d'*échappements libres*, on comprend, comme on le sait, tous les échappements qui sont soustraits à l'action continue de la force motrice, ou, en d'autres termes, ceux dans lesquels le balancier, en dehors de la faible période de l'impulsion, effectue sa vibration dans une indépendance complète de la roue. Le repos de cette roue, au lieu de se faire, comme dans les échappements dits à repos frottant, sur l'axe du balancier, se fait sur une pièce intermédiaire isolée.

Les principaux éléments qui entrent dans la composition des échappements libres, tels que les ancres, palettes, doigts, etc., qui reçoivent l'action de la roue, pour la transmettre au balancier, sont soumis aux principes généraux que nous avons indiqués précédemment pour les échappements simples.

Nous pourrons donc nous borner à faire connaître la disposition des pièces qui maintiennent la roue en repos, pendant les arcs supplémentaires, et de celles qui permettent à cette roue de se remettre en marche.

Le nombre des dispositifs, qui ont été proposés pour atteindre ce double résultat, est très-considérable, et il serait sans utilité de les décrire tous, d'autant plus que la plupart, après avoir joui d'une vogue passagère, n'ont pas tardé à être abandonnés définitivement. Pour ceux qui ont été conservés et dont l'apparition remonte à la première moitié de ce siècle, on trouvera, dans le corps de l'ouvrage, des descriptions très-complètes, avec

tous les détails historiques de quelque intérêt. Pour ceux-là, nous aurons donc simplement à faire connaître les modifications récemment introduites dans la forme ou la disposition de certaines pièces. Quant aux dispositifs qui ont vu le jour, depuis la publication de la seconde édition du traité de Moinet et qui paraissent susceptibles d'utiles applications, nous les décrirons avec des détails suffisants pour être compris de tous nos lecteurs.

ÉCHAPPEMENT A ANCRE POUR MONTRES.

Généralités. — L'échappement à ancre pour montres dérive de l'échappement à ancre et à repos de Graham pour pendules. Comme ce dernier échappement ne permet que des arcs de vibration peu étendus, il a été nécessaire, pour l'appliquer aux montres, d'en modifier la disposition et de rendre le balancier indépendant de la force motrice, pendant toute la période correspondant aux arcs supplémentaires.

Cette indépendance a été réalisée d'abord dans les dispositifs de Robin et de Pouzait; mais c'est à Th. Mudge que paraît devoir être attribuée la disposition moderne, dans laquelle les deux levées sont égales et l'impulsion répétée à chaque vibration du balancier, tandis que, dans l'échappement de Robin, l'une des deux vibrations était muette (M. p. 158, t. II.)

L'échappement à ancre moderne, avec ses levées et ses trous en rubis, est l'un de ceux qui donnent les meilleurs résultats pour les montres, lorsque toutes les proportions sont convenablement déterminées et que l'exécution des pièces est suffisamment soignée. La régularité de la marche est très-satisfaisante, à la seule condition de le nettoyer et de renouveler l'huile en temps convenable. Les surfaces frottantes, lorsqu'elles sont bien établies, fonctionnent très-longtemps sans usure sensible.

Description de l'échappement à ancre moderne (*fig.* 1 et 2, Pl. III). — La roue d'échappement R agit sur le balancier par l'intermédiaire d'un ancre, mobile autour d'un axe C et dont les deux bras, parfaitement équilibrés par rapport à cet axe, sont munis chacun d'une palette en rubis. La palette E est désignée ordinairement sous le nom de *levée rentrante*, tandis que l'autre F est la *levée sortante*. Les faces *ma* et *nc* forment les *repos* de l'ancre, *ab* et *cd* les *inclinés* ou les *fuyants*.

Le prolongement du bras de l'ancre, sur la droite de la figure, constitue la fourchette, qui est équilibrée par un contre-poids et se termine par deux cornes K et K'; au-dessus de l'entaille, qui sépare ces deux cornes, se trouve le *dard* D, dont la forme est celle d'un prisme triangulaire.

Sur l'axe du balancier *ff'* est ajusté, à frottement dur, le disque G, qui porte, en dessous, une cheville en rubis *o*, désignée sous le nom de *doigt de levée* ou *bouton de dégagement*.

Quant à la roue d'échappement, qui est plate, ses dents, comme pour

l'échappement à ancre des pendules, sont pointues ou terminées par un petit plan incliné.

Jeu de l'échappement. — Le jeu de cet échappement est facile à comprendre. L'ancre étant dans la position représentée sur la *fig.* 1, supposons que la roue se mette en mouvement, en tournant vers la droite. La dent, qui, au départ, était en H', vient prendre la position H, s'avance sur le plan incliné *ab*, qu'elle repousse, et finit par lui échapper. La dent M vient alors s'appuyer sur le bras F et la roue tombe au repos sur ce bras.

Le mouvement, transmis à l'ancre pendant cette demi-levée, est communiqué au balancier par la fourchette; la face *r* de son entaille, en s'appuyant contre le bouton *o*, le chasse devant elle et le fait sortir de l'entaille. Le balancier devient alors complétement indépendant de l'échappement et il fuit, sous l'impulsion qu'il vient de recevoir, en emportant le bouton dans son mouvement de rotation.

Pendant que le balancier achève sa vibration, l'ancre, qui s'appuie sur le plot A, est maintenu dans cette position par la pression de la dent M sur le bras F.

Lorsque le balancier, ramené par le spiral, exécute sa vibration en sens inverse, le bouton *o* rentre dans l'entaille et entraîne la fourchette.

Dans ce mouvement, la dent M arrive au bord *c* de l'incliné *cd* et lui imprime une vive impulsion. Sous cette action, qui tend à accélérer le mouvement de l'ancre, la fourchette ne tarde pas à prendre, sur le bouton, un excès de vitesse; elle le pousse alors et restitue au balancier le travail nécessaire à l'entretien de sa vibration, qu'il accomplit, d'ailleurs, comme la précédente, dans une indépendance complète du reste de l'échappement. Ramené par le spiral, le balancier opère un nouveau dégagement et les mêmes phases se reproduisent successivement.

On voit, d'après cela, que la roue a une double fonction, consistant à produire l'arrêt momentané du rouage, ou le repos, et à transmettre au balancier le travail nécessaire pour compenser ses pertes à chaque vibration.

Quant à la fourchette, son rôle est complétement passif, lorsque le bouton l'entraîne jusqu'au dégagement, tandis qu'il redevient actif lorsque, à son tour, elle pousse le bouton et transmet au balancier l'action des dents sur la levée de l'ancre.

Le mouvement angulaire de l'ancre entre les deux repos, ou sa course, peut être limité, soit par deux goupilles ou plots, soit par les parois de la creusure ménagée dans la platine pour son logement.

Les *cornes* de la fourchette ne jouent aucun rôle dans le jeu normal de l'échappement, puisque le bouton ne doit avoir de contact qu'avec les faces de l'entaille qui les sépare. Ces appendices ne constituent, à vrai dire, qu'une simple mesure de sûreté; ils sont uniquement destinés à

prévenir le renversement du balancier, dans le cas de vibrations trop étendues; il est évident qu'alors le bouton irait se heurter contre les faces extérieures de ces cornes.

Le *dard* a pour fonction d'empêcher l'ancre de *renverser*, dans le cas où, par suite d'une secousse, il se trouverait détaché de son plot d'appui. Le dard, en venant s'appuyer contre le disque G, maintiendrait la fourchette dans une position convenable, jusqu'à la rentrée du doigt dans l'entaille. En dehors d'une circonstance accidentelle de ce genre, il ne doit jamais y avoir de contact entre le dard et le disque, et c'est dans ce but qu'on ménage, entre ces deux pièces, un jour de sûreté.

Autre disposition de l'échappement à ancre. — Dans certaines fabriques, pour les pièces qui doivent être très-soignées, on adopte, de préférence, une disposition un peu différente de la précédente, et qui consiste à placer, sur une même ligne droite, les trois centres de l'ancre, du balancier et de la roue.

Dans cette disposition, qui est représentée *fig.* 3 (Pl. III), le bouton de dégagement est porté par un levier zPz' à deux bras, monté sur l'axe du balancier, et le disque est remplacé par un simple noyau de sûreté G, d'un diamètre beaucoup plus petit, dans lequel se trouve ménagée une échancrure pour le dard d, fixé à vis en dessous de la fourchette.

Le mouvement angulaire de cette fourchette est ordinairement limité, comme dans l'autre disposition, par deux plots A, B; quelquefois, ces plots sont supprimés et leur action remplacée par celle de la tige de la roue, contre laquelle viennent s'appuyer alternativement les bras y, y', qui forment les prolongements de la fourchette et servent à l'équilibrer. Mais ce mode d'arrêt paraît devoir être abandonné, car des percussions incessamment répétées sur la tige de la roue ne sont pas sans inconvénients.

PRINCIPES DE LA CONSTRUCTION DES ÉCHAPPEMENTS A ANCRE.

Ouverture de l'ancre. — Sur la *fig.* 1 (Pl. III), l'ouverture de l'ancre, mesurée d'un repos à l'autre, comprend deux vides et demi de la roue, c'est-à-dire que les deux bras embrassent trois dents. Naturellement, ce nombre de dents n'a rien d'absolu, mais il offre certains avantages et il convient de ne pas trop s'en écarter.

En premier lieu, on ne peut guère le diminuer, car alors, les surfaces de contact étant très-réduites, les effets seraient peu sûrs et l'exécution des organes devrait être extrêmement précise pour qu'il n'y ait pas de temps perdus.

En second lieu, si l'on prenait un plus grand nombre de dents, l'étendue des surfaces de frottement augmenterait, en même temps que le poids des

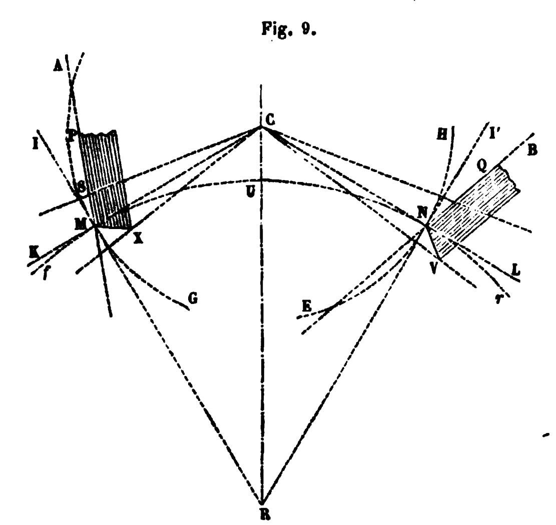
organes, et l'on se priverait, par suite, de tous les avantages qui sont la conséquence du raccourcissement des bras.

Détermination du centre de l'ancre. — La circonférence de la roue étant supposée donnée (*fig.* 9), ainsi que le nombre des dents, prenons un premier point M, pour l'extrémité d'une dent, et un deuxième point N, correspondant au milieu du troisième vide, à partir de M, puis traçons les rayons RM et RN.

Les deux perpendiculaires, menées aux extrémités de ces rayons, se couperont en un point C, qui donnera la position que doit occuper le centre de l'ancre, pour que l'échappement soit tangent. D'après ce que nous avons dit précédemment, les points M et N se trouvent placés dans la position la plus favorable, si l'on tient compte simplement de la facilité de dégagement des repos.

Mais l'ancre a encore deux autres fonctions, l'impulsion et le dégagement, qui, pour s'effectuer dans les meilleures conditions, devraient aussi se produire sur la tangente ou sur des lignes peu différentes.

Fig. 9.



Par suite de la nécessité du tirage, pour ce genre d'échappement, les repos ne peuvent pas se faire aux points de tangence; un seul point de la surface parcourue par la dent, pendant le dégagement, peut se trouver sur la tangente; ce sera, par exemple, le point M pour la palette PM et le point N pour la palette NQ.

Au lieu de placer ainsi les points de décrochement M et N sur la tangente, on pourrait y mettre les points milieux des plans inclinés MX et NV, ce qui, comme il est facile de le reconnaître, donnerait des impulsions à peu près égales. Toutefois, en examinant la question de plus près, on arrive à conclure qu'il est préférable de placer les points de décrochement sur la tangente, à la condition que les deux tirages assurent également bien la stabilité de l'ancre. Seulement, comme, dans ce cas, les deux bras sont un peu inégaux, l'établissement de ces deux tirages présente quelques difficultés, que nous allons essayer de faire comprendre.

A l'origine, les repos de l'ancre étaient formés d'arcs de cercle, concentriques au pivot; la roue n'avait alors aucun recul, pendant l'action du

dégagement, qui s'effectuait avec la plus grande facilité. Mais on n'a pas tardé à reconnaître qu'il était nécessaire de donner à la roue, pendant ce dégagement, un mouvement de recul assez sensible, ou, comme on dit, un *tirage*. Sans cela, la pression de la dent sur la palette ne serait pas suffisante pour maintenir convenablement au repos l'ancre, qui, sous l'action des secousses, pourrait se détacher du plot et aller s'appuyer par le dard contre le disque.

Pour obtenir ce tirage, on a remplacé chaque surface courbe des repos par un plan, disposé de telle sorte que le point de repos se trouvât, en dedans de la surface courbe, d'une quantité égale au recul à donner à la roue. La valeur de ce recul ne pouvait évidemment pas être déterminée par la théorie, et l'on a dû forcément la demander à l'expérience.

On a commencé par prendre le même angle de recul pour chaque bras; mais on n'a pas tardé à reconnaître qu'on n'obtenait pas ainsi l'égalité des tirages, quand la pénétration des dents sur la palette était un peu considérable. Pour corriger cette inégalité, on a été conduit à prendre 2 à 3° de plus pour la palette de gauche, c'est-à-dire qu'on a fait, par exemple, l'angle IMA égal à 15° et l'angle I'NB égal à 12° seulement.

Aujourd'hui, où les points de repos sont placés très-près du bord des palettes, cette différence, en faveur du tirage sur la levée rentrante, ne peut plus guère s'expliquer par la pénétration des dents et doit être considérée plutôt comme un correctif de l'inégalité des leviers CM et CN.

L'inégalité d'action des deux tirages doit aussi quelquefois être attribuée à des erreurs d'exécution et, dans ce dernier cas, on comprend que la stabilité de l'ancre puisse être médiocrement assurée. Il y a donc lieu d'attacher la plus grande importance à cette question. Comme dernière remarque, nous devons ajouter que l'action du tirage absorbe une certaine fraction de la force motrice et que, par conséquent, il est indispensable de donner aux montres, pourvues de l'échappement à ancre, une certaine épaisseur, afin de disposer d'une force motrice convenable.

De l'angle de levée. — Tavan, Jurgensen, etc., avaient indiqué 40° comme la valeur la plus convenable pour la levée totale. Pendant longtemps on s'est très-peu écarté de ce chiffre dans les ateliers. Toutefois, Moinet a proposé de l'augmenter et de le faire varier entre 50 et 60°, suivant la grandeur des montres (p. 374, t. II). Si l'on se reporte aux considérations que nous avons présentées pour l'échappement à cylindre, on s'expliquera facilement les raisons de ces différences. Avec l'échappement à ancre, en effet, le balancier doit avoir le même nombre de vibrations qu'avec d'autres échappements, et ces vibrations doivent être plus étendues; en outre, les organes intermédiaires, qui servent à transmettre l'action de la roue au balancier, ont ici des dimensions et des poids relativement considérables, de telle sorte qu'elles opposent une certaine ré-

sistance à tout changement brusque de mouvement. Dans ces conditions, au début de la levée, l'action de la fourchette sur le balancier est à peu près nulle, et elle ne devient réellement efficace que dans la dernière partie de l'impulsion. Il convient donc, pour ce motif, d'avoir une levée assez forte.

D'un autre côté, les balanciers des petites montres ayant un nombre de vibrations supérieur à celui des grandes, en même temps qu'ils présentent une masse plus faible, exigent une impulsion relativement plus prolongée. Il y a lieu, par suite, d'adopter pour les petites montres une levée un peu plus forte que pour les grandes.

D'une manière générale, on peut admettre le chiffre de 45° pour la levée totale, ce chiffre devant être augmenté pour les petits échappements et porté, par exemple, à 50 ou 52°, tandis qu'il devrait, au contraire, être réduit, pour les grands, à 40 ou 42°.

Nous devons, d'ailleurs, faire remarquer ici, ainsi que nous l'avons déjà fait souvent, que ces chiffres ne doivent être considérés que comme des valeurs moyennes, susceptibles d'être modifiées, suivant le degré de précision apporté dans l'exécution des pièces, le plus ou moins de masse des organes, etc.

Hauteur des inclinés. — L'étendue du mouvement angulaire de l'ancre, ou la levée, est déterminée par la hauteur de l'incliné qui termine chaque palette. Tout ce que nous avons dit sur les inconvénients d'une hauteur trop grande ou trop faible, pour le fuyant des dents de l'échappement à cylindre, est également applicable à l'échappement à ancre, et nous sommes, par suite, conduit à la même recommandation, qu'il convient d'éviter toute exagération dans un sens ou dans l'autre.

De l'observation raisonnée d'un grand nombre d'échappements à ancre, d'une marche satisfaisante, on peut conclure que les plans inclinés doivent être déterminés de manière à ce que, sous l'impulsion des dents de la roue, ils donnent à la fourchette un déplacement angulaire de 5° environ, de chaque côté de la ligne des centres, soit, au total, un déplacement de 10°.

Première méthode pour le tracé des inclinés. — Pour tracer ces inclinés, on peut, à la rigueur, utiliser la méthode indiquée précédemment pour l'échappement de Graham, appliqué aux pendules. Dans ce cas, en supposant les dents de la roue pointues, il suffit de mener, par le centre C de l'ancre (*fig.* 9), les deux lignes CX et CV, faisant respectivement, avec les deux tangentes CM et CN, des angles égaux à la demi-levée qu'on veut avoir, soit 5° par exemple, et de joindre ensuite, deux à deux, les points d'intersection de ces lignes avec les flancs des palettes.

Il importe, toutefois, de remarquer que cette méthode, qui est suscep-

tible d'une très-grande exactitude, lorsque les bras ont une grande longueur relativement aux palettes et que l'angle de levée est faible, comporte une cause d'erreur assez prononcée, lorsque ces conditions ne sont pas satisfaites.

Avec l'incliné MX, tel que nous venons de l'obtenir, l'angle décrit par le point X ne pourrait être égal à 5° que si ce point arrivait, à la fin du mouvement sur la tangente MC, et, comme, en réalité, la dent ne le repousse que jusqu'à la circonférence passant par sa pointe, il en résulte une perte de levée, correspondant à la longueur comprise entre la circonférence et la tangente, perte qui, avec les dimensions ordinaires, peut s'élever jusqu'à 1°, de telle sorte que la levée d'un côté se trouverait n'être que de 4°.

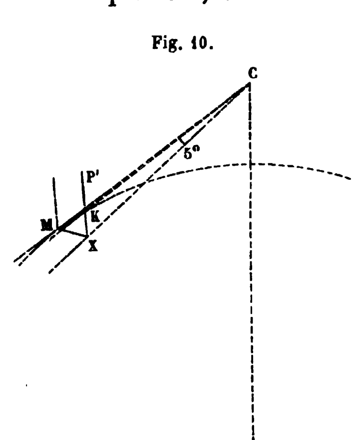
On pourrait corriger ce défaut, avec une approximation bien suffisante pour la pratique, en prenant l'angle MCX égal à 6° au lieu de 5°. Seulement, ce serait là une correction tout à fait empirique, et il est préférable de recourir à un tracé rigoureux, d'autant plus que ce tracé peut se faire sans difficultés.

Seconde méthode de tracé des inclinés. — Supposons, par exemple, qu'on veuille déterminer l'incliné de gauche; pour cela, il suffit de prendre le point K d'intersection de la circonférence de la roue avec la face XP′ de la palette (*fig.* 10), de joindre ce point au centre C de l'ancre et de mener ensuite la ligne CX, faisant avec CK l'angle de levée qu'on veut avoir.

La ligne CX coupe la ligne XP′ au point X, qui, joint au point M, détermine l'incliné de gauche MX. L'autre incliné se trouverait absolument de la même manière.

Théoriquement, ce tracé serait d'une exactitude rigoureuse, si le flanc XP′ était formé par un arc de cercle, décrit du centre C de l'ancre, au lieu de l'être par une ligne droite; mais l'erreur qui en résulte est tout à fait négligeable et absolument du même ordre que les erreurs d'exécution, même dans le travail le plus soigné.

Fig. 10.



Quand la naissance des inclinés coïncide, comme nous venons de le supposer, avec les points de tangence et que les dents sont pointues, chaque demi-levée commence juste lorsque la fourchette est sur la ligne des centres de l'ancre et du balancier, et cette fourchette décrit, de part et d'autre de cette ligne, un angle qui est exactement de 5°, si la levée totale est de 10°.

Mais si la naissance de ces inclinés était en dehors de la circonférence d'un certain angle, de 2° par exemple, la demi-levée serait, en réalité, augmentée de 2° et deviendrait égale à 7°, puisque cette demi-levée commencerait, lorsque la fourchette aurait encore à parcourir cet angle de 2°, avant d'arriver à la ligne des centres.

Le contraire aurait évidemment lieu, si la naissance des dents était de 2° à l'intérieur de la circonférence, la demi-levée ne commençant, dans ce cas, que lorsque la fourchette aurait dépassé la ligne des centres de 2°; la demi-levée réelle serait alors de 3° seulement.

Il peut donc arriver que, pour trois échappements, établis dans les conditions de ces trois hypothèses, on ait, avec une même levée apparente totale, des levées réelles très-différentes, qui nécessiteraient naturellement des forces motrices d'inégales intensités.

Dans tout ce qui précède, nous avons supposé qu'il s'agissait de dents entièrement pointues. Si ces dents étaient terminées par une tête large, portant un incliné de 2°, par exemple, comme celle de la *fig.* 1 (Pl. III), on devrait, pour obtenir la demi-levée réelle, combiner cet incliné avec celui de la palette. Ainsi, avec l'incliné MX, dont la naissance est sur la tangente et qui a été tracé avec 5°, la demi-levée commencerait 2° avant la ligne des centres, et la demi-levée réelle serait de 2° + 5° ou 7°.

Si la naissance de l'incliné de la palette était de 2° en dehors de la circonférence, au lieu d'être sur la tangente, la demi-levée commencerait 2° + 2° = 4° avant la ligne des centres; elle serait donc réellement de 5° + 4° = 9°. Enfin, avec la naissance de l'incliné de 2° en dedans de la circonférence, la demi-levée commencerait juste à la ligne des centres et serait exactement de 5°.

Dans tous ces différents cas, la levée totale apparente serait la même, c'est-à-dire 10°, tandis que les levées réelles seraient très-différentes. Nous avons suffisamment insisté jadis sur l'importance de la distinction à établir entre les levées réelles et les levées apparentes, pour qu'il n'y ait pas lieu d'y revenir.

Forme des inclinés. — La question de la meilleure forme à adopter pour les inclinés de l'échappement à ancre a, comme pour l'échappement à cylindre, donné lieu à de nombreuses discussions.

Tavan les terminait par deux arcs de cercle, décrits avec le rayon de la roue, l'un convexe pour la levée rentrante, l'autre concave pour la levée sortante. Jurgensen, en conservant la courbe convexe, remplaçait la seconde par une droite.

Au point de vue purement théorique, il pourrait y avoir quelque avantage à rechercher quelles sont les courbes les plus propres à assurer la régularité de la levée. Mais, en réalité, ces courbes ont une si faible étendue que leur tracé rigoureux n'est pas sans présenter des difficultés et

qu'on a toujours à craindre que les erreurs d'exécution ne fassent disparaître les avantages théoriques. Dans ces conditions, nous pensons que le mieux est de s'en tenir à l'usage qui a prévalu, parmi les praticiens, de terminer les palettes par des surfaces planes, dont l'exécution est beaucoup plus simple. Ces plans, comme ceux des inclinés dont il a été question jusqu'ici, doivent d'ailleurs être arrondis transversalement, *en baguette*, suivant l'expression technique, afin de diminuer l'étendue du contact avec les dents.

Détermination de la position du bouton et de la longueur de la fourchette pour une valeur donnée de la levée. — Lorsque les trois centres de la roue, de l'ancre et du balancier sont connus, il est facile de déterminer la longueur que doit avoir la fourchette et la position que doit occuper le bouton de dégagement pour un angle de levée donné.

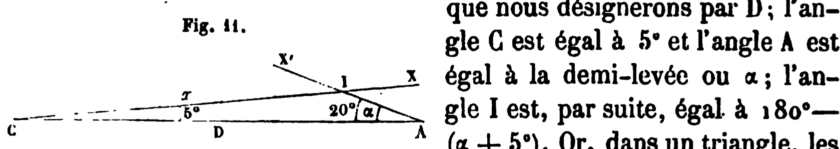
Supposons le mouvement angulaire total de la fourchette fixé à 10° et la levée totale de l'échappement à 40°.

Si, par les centres C et A de l'ancre et du balancier (*fig.* 1, Pl. III), on mène les lignes CX et AX′, inclinées respectivement de 5° et de 20° sur la ligne des centres, le point d'intersection I de ces lignes fournira les deux éléments cherchés. La longueur AI représente, en effet, la distance au centre du balancier du point de contact du bouton, au moment où finit la demi-levée.

En outre, l'arc de cercle TT′, décrit du point C, comme centre, avec CI pour rayon, donne, en même temps, la longueur de la fourchette, supposée mesurée du centre de l'ancre à la naissance des cornes.

Il est, d'ailleurs, facile de déterminer cette longueur par le calcul. En effet, dans le triangle CIA (*fig.* 11), où CI est la longueur cherchée, les angles en C et en A sont connus, ainsi que la distance des centres, CA, que nous désignerons par D; l'angle C est égal à 5° et l'angle A est égal à la demi-levée ou α; l'angle I est, par suite, égal à $180° - (\alpha + 5°)$. Or, dans un triangle, les côtés étant proportionnels aux sinus des angles opposés, on a la relation :

Fig. 11.



$$\frac{x}{D} = \frac{\sin\alpha}{\sin[180° - (\alpha + 5)]} = \frac{\sin\alpha}{\sin(\alpha + 5)}.$$

On voit, d'après cela, que, pour obtenir le rapport $\frac{x}{D}$, il suffit de calculer le rapport des sinus des angles α et $\alpha + 5$. Ainsi, par exemple, si la levée totale doit être de 40°, α est égal à 20°, et l'on a à prendre, dans ce cas, le rapport $\frac{\sin 20°}{\sin 25°}$; les tables de lignes trigonométriques donnent, pour ce rapport, $\frac{0,34}{0,42}$ ou, très-approximativement, $\frac{4}{5}$.

Pour une levée totale de 40°, la longueur de la fourchette doit donc être les quatre cinquièmes de la distance des centres de l'ancre et du balancier.

Le tableau suivant contient les valeurs de $\frac{x}{D}$, calculées pour des angles de levée variables, de 5° en 5°, depuis 35° jusqu'à 60°.

Rapport de la longueur de la fourchette à la distance des centres.	LEVÉE TOTALE 2α					
	35°	40°	45°	50°	55°	60°
$\frac{x}{D} =$	$\frac{0,30}{0,38}$ ou $\frac{15}{19}$	$\frac{0,34}{0,42}$ ou $\frac{4}{5}$	$\frac{0,38}{0,46}$ ou $\frac{9}{11}$	$\frac{0,44}{0,50}$ ou $\frac{5}{6}$	$\frac{0,56}{0,54}$ ou $\frac{6}{7}$	$\frac{0,50}{0,57}$ ou $\frac{7}{8}$

Tous les rapports de ce tableau, à l'exception du premier, peuvent être représentés, comme on le voit, par des fractions extrêmement simples.

La détermination de la longueur de la fourchette peut donc se faire aussi facilement par le calcul que par un tracé. Avec l'aide du tableau précédent, la première de ces méthodes peut être utilisée même par les horlogers qui ne seraient pas familiarisés avec l'usage des lignes trigonométriques. Elle a, sur la seconde, l'avantage d'éviter de reporter des angles, opération toujours assez délicate.

Ouverture de la fourchette. — Un autre élément important de la fourchette est son ouverture. Une entaille très-large offre l'avantage d'un dégagement plus facile et assure mieux le jeu du bouton et de la fourchette; mais, d'un autre côté, au point de vue de l'impulsion, il y a intérêt à réduire la largeur de cette entaille, ou, ce qui revient au même, le diamètre du bouton.

Dans ces conditions, l'expérience seule peut indiquer la limite à laquelle il convient de s'arrêter. Le bouton ayant une forme ovale ou triangulaire, on admet que sa plus grande dimension, c'est-à-dire sa largeur, doit, en général, être prise égale au tiers de l'écartement de deux dents de la roue.

Observations sur la distance des centres de l'ancre et du balancier. — Dans la détermination de la longueur de la fourchette, nous avons supposé donnée la distance des centres de l'ancre et du balancier. Cette distance est également arbitraire dans une certaine mesure; toutefois, il est facile de comprendre qu'elle ne doit être ni trop grande ni trop petite.

L'exagération de cette distance ou, ce qui revient au même, de la longueur de la fourchette, donne lieu à divers inconvénients; la fourchette et son contre-poids deviennent plus lourds et, par suite, l'inertie de l'ancre, ou sa résistance au mouvement, se trouve augmentée; les frottements

s'exercent sur de plus grandes surfaces; le plateau fixé sur l'axe du balancier devient également plus lourd et exige un spiral plus énergique, etc. En résumé, une augmentation de longueur de la fourchette a pour résultat d'augmenter toutes les résistances de l'échappement, d'accroître les causes de perturbation et de rendre indispensable l'emploi d'une force motrice plus considérable.

Une réduction trop prononcée de cette longueur n'aurait pas moins d'inconvénients, car elle se traduirait par des jours de sûreté trop faibles, des temps perdus, des pressions exagérées, etc.

D'après une règle empirique, qui se trouve assez bien justifiée par l'observation d'un grand nombre de montres, d'une marche satisfaisante, on peut admettre que la distance des centres de l'ancre et du balancier ne doit pas dépasser sensiblement le diamètre de la roue d'échappement.

Cette règle ne peut évidemment avoir rien d'absolu, puisque des montres de même grandeur possèdent souvent des roues d'échappement de diamètres assez différents, mais elle peut être admise comme première approximation.

Forme des dents. — Les dents, dans l'échappement à ancre, affectent plusieurs formes différentes. Avec les dents pointues, qui sont surtout employées dans les fabriques anglaises, les plans d'impulsion se trouvent portés tout entiers par les palettes de l'angle. Ces dents, qu'on ne peut faire qu'en laiton, ont l'inconvénient d'être exposées à l'usure et à la déformation, de garder difficilement l'huile et, enfin, de donner lieu à une résistance assez forte pour le dégagement. Par contre, elles offrent l'avantage d'être d'une exécution facile et de pouvoir marcher encore un certain temps, malgré l'épaississement de l'huile; en outre, comme les becs, avec ces dents, ont naturellement une plus grande largeur, ils peuvent recevoie une couche d'huile plus forte.

En France et en Suisse, on a adopté, à peu près exclusivement, les dents *en tête* (larges et renflées à leur extrémité). Dans ce cas, chaque plan d'impulsion se trouve réparti, à peu près également, entre la dent et la palette de l'ancre, de telle sorte que la largeur de cette palette n'est guère que la moitié de ce qu'elle est avec les dents pointues.

Les dents en tête gardent mieux l'huile, sont moins exposées à la déformation et à l'usure, permettent une chute plus faible, etc. Mais, d'un autre côté, leur construction est plus compliquée et exige des ouvriers très-exercés.

Il est évident, d'après cela, que l'échappement à ancre, avec cette dernière forme de dents, doit donner une régularité de marche supérieure à celle qu'on obtient avec les dents pointues et d'une plus longue durée, à la condition, bien entendu, qu'il soit établi avec toute la précision que comportent ses divers organes. Mais, si la disposition des pièces est vicieuse

et leur exécution défectueuse, l'échappement à dents en tête peut donner des résultats inférieurs à ceux de l'échappement à dents pointues, dont la construction plus simple peut être confiée, sans inconvénients sérieux, à des ouvriers ordinaires.

ÉCHAPPEMENT LIBRE A DÉTENTE.

Généralités. — L'échappement libre *à détente* est surtout employé dans les montres marines et les chronomètres portatifs. L'élément principal de cet échappement, la *détente*, se présente sous deux formes différentes, qui constituent deux variétés d'échappements.

Dans la *détente pivotée* ou *à bascule*, cette dernière pièce est montée sur un axe à pivots. Un ressort droit, fixé sur la platine, ou un ressort spiral, monté sur cet axe, a pour fonction de ramener à la position de repos, lorsqu'il en a été écarté, le bras de cette bascule, qui produit l'arrêt de la roue.

Dans la *détente-ressort*, le bras de la détente et le ressort sont d'une seule pièce et le dégagement de la roue se produit par l'élasticité de ce ressort.

Le principe de l'échappement libre est dû à Pierre Le Roy, qui en fit la première application à une montre marine, terminée en 1766.

F. Berthoud est le premier qui ait fait usage de la détente-ressort, laquelle ne tarda pas à être adoptée par l'horloger anglais, J. Arnold, qui, après en avoir modifié la forme, en fit de nombreuses applications et finit même par lui donner son nom, bien que le mérite de son invention revienne à l'artiste français.

Earnshaw apporta plus tard quelques changements à la disposition d'Arnold et donna également son nom à l'échappement modifié. Pour la description des types, dus aux divers artistes que nous venons de citer, nous renverrons aux articles de Moinet (p. 381 et suiv., t. II), et nous nous bornerons à indiquer, avec quelques détails, les modifications successives, qui ont amené l'échappement à détente aux formes aujourd'hui en usage.

ÉCHAPPEMENT A DÉTENTE-RESSORT.

Disposition de l'échappement. — Dans cet échappement, qui est représenté *fig.* 4 et 5 (Pl. III), la roue O, qui est plate et à dents aiguës, fait son repos sur un petit cylindre en rubis C, entaillé à moitié à sa partie supérieure et qui porte ordinairement le nom de *talon d'arrêt*, de *bouton de repos* ou même simplement de *repos*.

Ce talon se trouve en saillie sur la pièce de détente, qui est fixée à la platine et dont le centre de flexion se trouve dans la partie amincie R. Un

petit ressort *mn*, désigné sous le nom de *pied-de-biche*, s'appuie contre une petite saillie *p* de la pièce de détente, de telle sorte qu'il ne peut fléchir, de gauche à droite (de *n* vers *p*), sans entraîner cette détente.

Sur l'axe du balancier est fixé un disque en acier Q (le *cercle*), dans lequel est encastrée la levée en rubis ou palette d'impulsion I. Le même axe porte, au-dessous du disque, le rouleau F, muni d'un petit doigt de dégagement *f*.

La détente vient buter contre la tête de la vis *eg*, qui porte le nom de *vis d'arrêt* ou *vis de rappel*.

Jeu de l'échappement. — Avec l'échappement, disposé comme l'indiquent les figures, si l'on vient à armer le ressort moteur, il ne se produit qu'une pression de la dent de la roue sur le plat du talon d'arrêt C. Mais, si, par des secousses, on imprime un mouvement circulaire à tout l'appareil, de telle sorte que le balancier se mette à osciller, de droite à gauche, par exemple, le doigt *f* vient presser l'extrémité *n* du pied-de-biche, le fait fléchir et échappe.

Dans l'oscillation inverse du balancier, que produit le spiral, le même doigt *f* vient de nouveau rencontrer ce pied-de-biche et le pousser; cet effort se transmet à la saillie *p* de la détente, qui se trouve ainsi entraînée et produit le dégagement de la dent *v* de la roue, laquelle, devenue libre, se met en mouvement.

La dent *r* ne tarde pas à rencontrer la palette I et l'entraîne, pendant un certain temps, en lui transmettant l'impulsion. Avant la fin de la levée, la détente, en vertu de son élasticité, est revenue à sa position primitive, et la dent *s*, qui précède la dent *r*, vient alors s'arrêter sur le repos C.

Le balancier, ayant ainsi reçu l'impulsion, décrit son arc supplémentaire, puis revient en sens inverse, en effectuant une vibration muette, pendant laquelle il ne fait qu'écarter le petit ressort, qui fléchit seul. Le balancier ne reçoit donc l'impulsion que de deux en deux vibrations, c'est-à-dire que l'échappement est à *coup perdu*. Il offre l'inconvénient de ne pas se mettre en marche de lui-même, lorsqu'on arme le ressort-moteur, ou, comme on dit, de s'arrêter au doigt.

Échappement à détente-ressort de Breguet. — La disposition adoptée par Breguet est représentée *fig.* 6 et 7 (Pl. III). Le simple examen des figures suffit pour se rendre compte de la disposition et du jeu de cet échappement.

Le repos de la roue se fait sur la tangente au cercle des dents, qui sont au nombre de quinze. Comme, avec ce nombre de dents, on a voulu avoir une levée de 60°, il a été nécessaire, pour un motif que nous indiquerons plus loin, de placer l'axe du balancier un peu en dehors de cette tangente.

Du reste, le point d'attaque sur la levée et le point d'appui du repos ont été déterminés de manière à éviter, à peu près, tout effet de torsion sur les ressorts de la détente.

Le seul défaut qu'on ait reproché à ce dispositif consiste dans l'écartement du plateau et du balancier, qui se trouvent placés aux deux extrémités de leur axe commun. On a prétendu que c'était à cette cause qu'il convenait d'attribuer certaines irrégularités de marche, constatées dans plusieurs chronomètres, munis de cet échappement. Sans vouloir contester absolument un point, sur lequel nous manquons de renseignements suffisamment précis, nous croyons cependant que l'insuccès relatif de l'échappement de Breguet pourrait tout aussi bien provenir de cette circonstance que la plupart des fabricants, qui ont tenté de le reproduire, ne paraissent pas avoir compris l'importance du choix des points d'attaque et de repos, et qu'en modifiant les positions adoptées par Breguet, ils ont fait disparaître une partie des avantages incontestables de la disposition proposée par cet habile artiste.

ÉCHAPPEMENT A DÉTENTE PIVOTÉE OU A BASCULE.

Disposition moderne. — L'échappement à bascule, que représente la *fig.* 1 (Pl. IV), ne diffère guère de l'échappement à détente-ressort que par la disposition même de la pièce de détente.

Le demi-cylindre, sur lequel doit se faire le repos de la roue, est monté sur une pièce spéciale H, désignée sous le nom de *bascule* et qui est mobile autour d'un axe Z, monté sur deux pivots. Cette bascule doit être rigoureusement équilibrée, afin d'éliminer complétement les effets de la pesanteur sur sa masse, quelle que soit la position de la montre. Sur l'axe est monté un ressort spiral S, destiné à ramener la bascule (contre un plot d'arrêt) dans sa position naturelle, lorsqu'elle a été déplacée, pour permettre le mouvement de la roue.

Sur cette même bascule, et près de son axe, se trouve encastrée une lame droite flexible P, ou pied-de-biche, qui s'appuie légèrement sur l'extrémité de la bascule.

L'axe du balancier porte, comme les échappements à détente-ressort, un plateau et un rouleau, dans lesquels sont encastrés respectivement la palette d'impulsion et le doigt de dégagement.

Jeu de l'échappement. — Le jeu de l'échappement à bascule est complétement analogue à celui de la détente-ressort; il est, comme lui, à *coup perdu.*

Dans l'oscillation du balancier, de droite à gauche, le doigt de dégagement se borne à faire fléchir l'extrémité de la petite lame flexible, pour lui échapper, tandis que, dans l'oscillation inverse, la pression que le doigt

exerce sur cette lame a pour résultat d'entraîner la bascule et de lui donner un mouvement de rotation, de gauche à droite, autour de son axe; cette rotation produit le dégagement de la dent, qui est au repos sur le plat du demi-cylindre d'arrêt.

La roue se mettant alors en mouvement, sous l'action de la force motrice, l'une de ses dents ne tarde pas à rencontrer la palette d'impulsion et à communiquer, par suite, au balancier la force vive dont il a besoin, pour compenser les pertes qu'il tend à faire dans sa double oscillation. Puis le doigt abandonne la lame élastique et la bascule, sous l'action de son ressort spiral, et revient à sa position naturelle, en temps convenable, pour arrêter au passage la dent suivante de la roue.

Remarque. — Dans la disposition adoptée à l'origine par L. Berthoud et reproduite plus tard par Motel, le ressort de dégagement était très-incliné sur la direction de la bascule. Le retour de cette bascule à sa position naturelle était produit par un petit ressort de rappel rectiligne, agissant perpendiculairement à la direction de cette bascule, près de son axe.

La modification, qui a consisté à remplacer ce ressort droit par un ressort-spiral, a été un perfectionnement sérieux, qui a notablement augmenté la valeur de cet échappement.

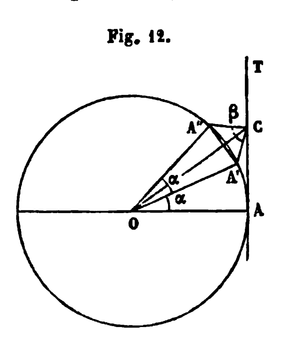
M. Henri Robert, qui a employé l'échappement à bascule dans les chronomètres de bord, a disposé le petit ressort de dégagement, de manière à ce qu'il vise sensiblement au centre de l'axe du balancier, tandis que, dans les dispositions antérieures, la direction de ce ressort passait notablement en dedans. Il a, en outre, proposé, pour l'inclinaison du devant des dents sur le rayon, un angle de 30°, qui est généralement admis aujourd'hui.

Détermination des positions du centre du balancier et du repos. — Si l'on examine avec soin les différentes dispositions d'échappements à détente que nous avons indiquées, on peut remarquer que le repos de la roue se trouve sur une tangente à la circonférence de cette roue, tandis que le centre du balancier se trouve plus ou moins en dehors. En théorie, il serait préférable que ce centre fût placé également sur cette ligne. Comme on s'en écarte généralement, il y a lieu de rechercher la cause de l'abandon d'un principe, dont la valeur n'est contestée par personne. Cette cause, comme nous allons le voir, tient à ce qu'avec un nombre donné de dents à la roue, l'angle de la levée se trouverait déterminé, si l'on s'assujettissait à la condition de placer le centre du balancier sur la tangente passant par le point de repos.

Traçons, en effet, le cercle des dents et soient A, A′, A″ (*fig.* 12) les extrémités de trois dents consécutives, en partant de celle qui est au repos en A.

D'après ce que nous avons vu, la levée correspondra à l'angle décrit par la roue, pour passer de la position A″ à la position A′. Si donc on veut que le centre C du balancier se trouve sur la tangente AT, il faudra, pour déterminer ce centre, élever une perpendiculaire sur le milieu de A′A″ et prendre son intersection avec la ligne AT. L'angle A″CA′, dans ces conditions, sera l'angle de la levée. Si nous désignons par β cet angle et par α l'angle A″OA′, un calcul, assez simple, mais dont il nous paraît inutile de reproduire les détails, donne, entre les lignes trigonométriques de ces angles α et β, la relation suivante :

Fig. 12.



$$\operatorname{tang}\frac{\beta}{2} = \frac{\sin\frac{\alpha}{2}\cos\frac{3\alpha}{2}}{1 - \cos\frac{\alpha}{2}\cos\frac{3\alpha}{2}}.$$

L'angle α est déterminé par le nombre des dents de la roue :

Ainsi, pour une roue de 15 dents, on a $\alpha = \frac{360}{15} = 24°$,

» 12 » $\alpha = \frac{360}{12} = 30°$,

» 10 » $\alpha = \frac{360}{10} = 36°$.

Si l'on remplace successivement α par ces différentes valeurs, la formule précédente donne pour β les nombres suivants :

Valeurs de α = 24°, 30°, 36°,
» β = 78°, 60°, 45°.

Il résulte de là qu'en plaçant le centre du balancier sur la tangente au repos, l'angle de levée serait de 78°, avec une roue de quinze dents, de 60°, avec douze dents et enfin de 45°, avec dix dents seulement.

Les considérations théoriques, exposées précédemment pour les échappements simples et corroborées par l'expérience, montrent que, dans chaque cas particulier, il existe un angle de levée qui est le plus convenable, eu égard aux différents éléments de la marche, force motrice, nombre et étendue des vibrations du balancier, etc.

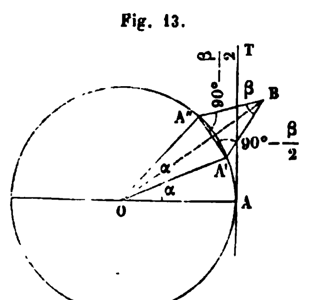
Dans les chronomètres bien exécutés, une levée voisine de 45° est suffisante, pour donner au balancier une étendue de vibration convenable. Si donc on s'imposait la condition de placer l'axe de ce balancier sur la

tangente, il faudrait nécessairement employer une roue de dix dents seulement.

Or, le mouvement du balancier étant réglé à un nombre de vibrations déterminé par seconde (quatre, par exemple), la roue de dix dents devrait être animée d'une vitesse angulaire plus grande que celle d'une roue de quinze dents, ce qui aurait forcément pour conséquence une augmentation du travail des frottements et de la force motrice, sans compter les dimensions plus considérables du plateau et de la détente. Comme tous ces inconvénients ne seraient que très-imparfaitement compensés par les avantages que procurerait la position du centre du balancier sur la tangente, il est évident qu'il convient de renoncer à cette position et de reporter l'axe du balancier en dehors de cette tangente et sur la droite, de manière à obtenir l'angle de levée qu'on estime être le plus convenable, en tenant compte des différents éléments dont on dispose.

La détermination de la position du centre du balancier, pour un angle de levée donné, peut, d'ailleurs, se faire au moyen d'une construction très-simple. Si l'on suppose, en effet, que B (*fig.* 13) soit le point cherché, l'angle A'BA″ sera l'angle de levée β et la perpendiculaire BM menée par le milieu M de A'A″ sera la bissectrice de cet angle, c'est-à-dire que les deux angles MBA' et MBA″ seront égaux à la moitié de l'angle de levée. Les triangles A″MB et A'MB étant rectangles, les angles en A″ et A' ont tous les deux pour valeur $90° - \frac{\beta}{2}$. Si donc, en ces points A' et A″, on trace, au moyen d'un rapporteur, deux lignes faisant chacune avec A'A″ un angle égal à $90° - \frac{\beta}{2}$, ces deux lignes, par leur intersection, fourniront le point B. Comme vérification de l'exactitude du tracé, ce point d'intersection devra se trouver sur la perpendiculaire élevée au milieu de A'A″.

Fig. 13.



Pour une levée de 44°, par exemple, chacun des angles en A' et A″ devra être fait égal à $90° - 22° = 68°$.

Quant au repos lui-même, sa position sur la tangente n'offre d'avantage évident que si la surface de repos est concentrique au centre de mouvement de la détente. Mais, lorsqu'on donne un certain tirage, ce qui paraît indispensable pour la stabilité de la détente au repos, il est préférable d'adopter une autre position, pour le point de contact de la dent, et de le mettre, par exemple, à l'intersection du cercle de la roue avec la ligne qui représente le plat du repos et qui fait avec le rayon, passant par le point de contact de la tangente, un angle égal à l'angle de tirage, lequel est, en moyenne, de 12°.

DISPOSITIONS NOUVELLES D'ÉCHAPPEMENTS LIBRES POUR CHRONOMÈTRES.

L'échappement adopté, presque exclusivement, pour les chronomètres de marine est l'échappement libre, inventé par P. Leroy, mais avec les modifications qui lui ont été apportées ultérieurement par un grand nombre d'habiles artistes, tels que F. Berthoud, Arnold, Earnshaw, H. Robert, L. Breguet, etc. Nous avons déjà fait connaître ces diverses modifications, qui ont fini par constituer autant de variétés, désignées chacune sous le nom de leur auteur. Dans les quinze dernières années, plusieurs dispositions nouvelles ont été proposées, mais il n'en est qu'un bien petit nombre qui paraissent devoir être conservées, et c'est à celles-là que nous nous bornerons.

Échappement libre de Frodsham. — Le caractère distinctif de cet échappement réside dans la forme de la roue d'échappement, qui offre deux sortes de dents : les unes destinées à assurer le repos, les autres à donner l'impulsion au balancier. Comme ces dernières ont un profil à peu près épicycloïdal, il en résulte qu'elles agissent sur le plateau de la levée à la façon des dents d'une roue qui conduit un pignon.

Les dents de repos sont en saillie sur le limbe de la roue d'échappement et sont légèrement plus éloignées du centre que les dents d'impulsion, mais elles peuvent passer librement, grâce à une entaille pratiquée dans le plateau. Ici, comme d'ailleurs dans toutes les roues d'échappement à double denture, chaque dent n'a qu'une seule fonction à remplir, pour chaque tour de la roue, ce qui permet de la terminer par une pointe très-fine. Le principal inconvénient de cet échappement tient aux difficultés d'exécution de la roue à double denture.

Échappement libre à détente brisée et articulée de M. L. Richard. — Cet échappement, qui est représenté *fig.* 2, Pl. IV, diffère de la détente à ressort ordinaire, en ce que la pièce de détente D est interrompue en x et que le décrochement se produit par l'intermédiaire de la petite pièce ab, qui constitue une espèce de détente à bascule, mobile autour du pivot p. L'examen de la figure suffit pour comprendre quel est le jeu de cette détente, pendant la vibration directe ou rétrograde du balancier.

Cet échappement a très-peu de chute, ce qui est un avantage sérieux, au point de vue de la régularité du fonctionnement. De plus, pendant son repos sur la détente-ressort D, la roue d'échappement exerce, sur cette détente, un effort de traction, tandis que, dans la disposition ordinaire que nous avons précédemment indiquée, cette action est un effort de compression, auquel se prête beaucoup moins bien la forme de cette pièce. A ce point de vue, la disposition de M. Richard réalise un perfectionnement réel.

Échappement libre excentrique à ressort et irrenversable. — Cet échappement, qui est représenté *fig.* 3, Pl. IV, est encore dû à M. L. Richard. C'est une modification d'un dispositif qu'il avait antérieurement présenté, sous le nom d'échappement universel.

Dans la position des pièces représentée sur la figure, la dent D de la roue d'échappement est au repos en *r* sur la pièce circulaire B, sous laquelle est fixée à frottement une détente M. Deux plots, fendus en tête de vis, P, P, servent, par l'intermédiaire de la goupille *g*, à limiter le mouvement angulaire de tout le système et, en particulier, les pénétrations sur les deux repos *s* et *r*.

Le ressort *d*, fixé sur la détente M par un plot allongé *m*, passe librement entre les deux goupilles *i*, *i*.

Sur l'axe du balancier X, et sous le doigt de levée *n*, est fixé un excentrique E, muni d'une ouverture *o*. Si l'on suppose cet excentrique tournant dans le sens de la flèche F, le ressort *d* arrive à entrer dans l'entaille *o* et produit le dégagement de D en *r* ; la dent D′ donne alors l'impulsion au balancier, en agissant sur le doigt *n*.

Lorsque le mouvement de l'excentrique se produit en sens inverse, dans le sens de la flèche F′, *d* rentre de nouveau dans l'entaille et en ressort, pour prendre la position représentée sur la figure; M et *d* sont alors dégagés de tout contact, le balancier est complétement libre et la dent D, qui s'était arrêtée sur le repos *s*, s'est dégagée en faisant une petite chute. La grande chute se produit lorsque l'excentrique E tourne de nouveau dans le sens de la flèche F et qu'une nouvelle dent vient tomber sur le doigt d'impulsion *n*.

Cet échappement, qui est d'une exécution facile et d'une disposition relativement simple, offre une très-grande régularité de marche, ne s'arrête pas au doigt et n'est pas exposé au renversement, lors même que le balancier, par une secousse imprévue, ferait plusieurs tours de vibration. Enfin, et c'est là l'avantage le plus précieux de ce dispositif, le balancier n'éprouve aucune résistance pour faire sortir du repos les dents de la roue d'échappement.

ÉCHAPPEMENTS DITS DE GRAVITÉ POUR PENDULES.

Les Anglais désignent, sous le nom d'*échappements de gravité*, toute une série de dispositifs, dans lesquels les oscillations du pendule sont entretenues par les impulsions que lui communiquent deux appendices pendulaires, ou détentes, qui sont alternativement écartés de leur position de repos par la roue d'échappement.

Les types les plus anciens de ce genre d'échappements sont ceux de Th. Reid et de Cole, dans lesquels le retour des appendices ou détentes à leur position de repos est dû à la réaction d'une lame élastique.

Échappement de Denison. — Dans l'échappement de Denison, de création plus récente, les détentes fonctionnent sous l'influence de la pesanteur seule et constituent, en quelque sorte, des détentes à poids. Ce dispositif devrait, par suite, être considéré comme le véritable type des échappements de gravité.

La *fig.* 4 (Pl. IV) représente la disposition primitive donnée par Denison à son échappement. La roue porte deux sortes de dentures très-différentes. L'une de ces dentures comprend trois chevilles *a*, *b*, *i*, distribuées régulièrement autour du centre de la roue et à une faible distance, tandis que l'autre se compose de trois dents, *p*, *q*, *r*, dont les pointes sont six fois plus éloignées du centre que les chevilles.

Les rayons menés du centre de la roue à ces pointes et aux chevilles doivent se confondre avec les rayons d'un hexagone régulier. Les deux détentes S et R sont mobiles sur pivots.

Pour expliquer le jeu des divers organes, supposons que la figure corresponde au moment où la détente S cesse d'actionner le pendule, qui, devenu libre, continue à osciller vers la droite, jusqu'à ce que la tête de vis *m* rencontre la cheville en saillie sur le bras de la seconde détente R. Par suite du déplacement imprimé à ce bras, le décrochement de la dent *r* se produit, la roue se met à tourner et, par sa cheville *b*, repousse la détente S jusqu'à la position pointillée, où cette détente est saisie et maintenue en l'air par la pression de la dent *p* sur le repos *f*, les trois dents de la roue occupant alors les positions *f*, *h*, *j*.

Dans son mouvement de retour, le pendule reste accompagné de la détente R, jusqu'à ce qu'il soit arrivé à la verticale, et la détente S se trouvant alors dans la même position que celle représentée sur la figure pour la détente R, l'action, qui s'est accomplie à droite, se répète à gauche et ainsi de suite indéfiniment.

La différence entre les deux repos, pour chaque détente, constitue la durée de l'impulsion, dont l'énergie varie avec les poids des boules *e* et *d*. On voit que, dans cette disposition, toutes choses égales d'ailleurs, le décrochement exige environ six fois moins de force que dans les échappements dont la roue ne porte qu'une seule denture, et il se fait sans bruit. Mais, par contre, il y aurait une chute considérable, si l'on n'avait soin de placer sur l'axe de la roue un volant VV', destiné à amortir les chocs.

Le principe de Denison, qui a reçu de nombreuses applications en Angleterre, permet, comme on le voit, d'obtenir un décrochement facile des dents de la roue de repos, en même temps qu'il fournit des impulsions uniformes et indépendantes du rouage.

Le frottement qu'entraîne le décrochement est si faible que ses effets sont, pour ainsi dire, impossibles à apprécier dans les horloges de grandes dimensions, de telle sorte qu'on peut faire varier le poids moteur, le doubler, par exemple, sans que l'amplitude de l'oscillation du pendule en soit

augmentée d'une façon sensible. Avec un échappement à repos ordinaire, au contraire, le plus léger changement dans le poids moteur a pour conséquence une variation notable dans l'étendue de l'arc décrit par le pendule.

Échappement de M. J. Clark. — Dans le but de diminuer encore le frottement dû au décrochement, le docteur J. Clark a imaginé une disposition extrêmement délicate, qui se trouve représentée par les *fig.* 1 et 2, Pl. V.

La roue d'échappement porte six bras rayonnants, B, B... pour les repos et trois chevilles *c*, *c*... destinées à écarter les détentes à poids D, D. Le repos, au lieu de s'effectuer sur ces détentes elles-mêmes, comme dans l'échappement de Denison, se fait sur la surface cylindrique d'un petit rouleau d'acier R, espèce de détente à pivots, munie d'encoches, et que le pendule fait tourner sur son axe, par l'intermédiaire d'une petite fourchette *f*. Chaque dent de la roue de repos s'appuie sur la surface de ce rouleau, jusqu'à ce que le mouvement de rotation amène, en regard d'elle, un encoche, qui lui permet d'échapper. La roue tourne alors d'un sixième de tour, écarte, par l'une de ses chevilles *c*, l'une des détentes de gravité D, qui doit agir sur le pendule, et la dent suivante vient tomber au repos sur le rouleau, où elle séjourne, de même que la précédente, jusqu'à ce que le passage d'une nouvelle encoche lui permette de se décrocher à son tour.

C'est, comme on le voit, la chute des détentes, écartées de leur position d'équilibre, qui donne l'impulsion au pendule et entretient ses oscillations ; quant au rouleau, ses fonctions offrent beaucoup d'analogie avec celles du rouleau de l'échappement *Duplex* (M. p. 361, t. II).

Dans un régulateur construit sur ce principe par MM. Dent, de Londres, les proportions de la roue d'échappement ont été déterminées de telle manière que la pression des dents de repos sur la surface du rouleau n'est que le douzième de l'effort nécessaire pour l'écartement des détentes de gravité. D'un autre côté, en calculant les rapports des forces, d'après les longueurs des leviers de transmission, on trouve que, pour opérer le dégagement de la roue d'échappement, le pendule doit dépenser à peine $\frac{1}{400}$ de l'impulsion que lui communique chaque détente. Comme, d'ailleurs, cet échappement n'a aucune tendance à filer, il n'est pas nécessaire de le munir d'un volant, ce qui permet de réduire notablement le poids moteur ; il en résulte naturellement que les frottements sur les pivots sont moindres et que la détérioration du rouage est beaucoup moins rapide.

Échappement à double roue de gravité de MM. Dent. — Cet échappement, qui est encore une modification de celui de Denison, est particulièrement applicable aux horloges monumentales. Il est représenté *fig.* 3, Pl. V.

La roue d'échappement se compose de deux roues distinctes, munies chacune de trois longues dents de repos A, B, C et *a*, *b*, *c*. Ces deux roues sont fixées sur le même axe, mais suffisamment écartées l'une de l'autre, pour laisser osciller librement, entre elles, les palettes de gravité G, G', qui sont mobiles autour de pivots X, X', situés aussi près que possible de l'axe de suspension du pendule H.

Autour de l'axe commun de ces deux roues de repos et dans l'intervalle qui les sépare, sont disposées trois goupilles *r*, *s*, *t*, qui figurent une espèce de pignon à lanterne, à trois alluchons, et dont les tourteaux seraient formés par les parties centrales des roues de repos. Ces goupilles, dites de *levée*, agissent alternativement sur les palettes G et G' et les écartent d'une certaine quantité, en tournant dans le même sens que les roues de repos, puisque tout ce système est solidaire.

Pour l'intelligence du dessin, on a supposé la tige du pendule coupée sur une partie de sa longueur, de sorte qu'il ne reste qu'une partie de la lame de suspension L et une fraction de la tige M, contre laquelle viennent presser, en P et P', les palettes de gravité.

Sur les deux faces de chacune de ces palettes sont disposées deux levées N et N', dont les surfaces de contact visent le centre de la roue, et sur lesquelles les rayons de la roue d'échappement viennent alternativement faire repos.

La figure représente l'échappement dans la position où l'une des goupilles ayant agi sur le bras G' de la palette de droite, l'un des rayons B de la double roue fait repos sur la levée N. A ce moment, le pendule, ramené vers sa position d'équilibre par la palette G, qui agit sur lui par son poids, dépasse d'une certaine quantité cette position, et sa ligne M ne tarde pas à arriver en contact, en P', avec la palette G', qu'elle écarte. Le décrochement de la dent B a lieu et le pendule achève de décrire l'arc supplémentaire de l'oscillation, en entraînant la palette G'. Immédiatement après ce décrochement, la double roue se met à tourner, et la goupille *t* rencontrant le bras de la palette G, l'écarte jusqu'à ce que le rayon *b* vienne tomber au repos en N'. Pendant que cette fonction s'accomplit, le pendule, ramené dans sa position d'équilibre, par l'action de son poids propre et celui de la palette G', dépasse cette position vers la gauche et vient écarter la palette G, ce qui opère le décrochement en N'; puis, une nouvelle goupille agit sur le bras de la palette G' et l'écarte; il se produit un nouveau repos en N, et ainsi de suite.

Les oscillations du pendule sont ainsi entretenues par l'action des palettes. Vers la fin de chaque oscillation, pendant la durée de l'arc supplémentaire, le pendule doit écarter l'une des palettes, ce qui tend, à la rigueur, à diminuer l'amplitude; mais cette palette, à son tour, agit sur la pendule, dès le début de l'oscillation suivante, et pendant un arc plus grand que le précédent, de toute la quantité dont elle a été écartée par

la goupille. L'arc d'impulsion, proprement dit, est donc constitué, en réalité, par la différence entre l'arc décrit par le pendule, pendant qu'il subit l'action de la palette, revenant à la position d'équilibre, et celui pendant lequel il a soulevé cette même palette.

Comme chaque palette, écartée de sa position de repos, y revient, sous l'action de la même composante de la pesanteur, il en résulte que l'impulsion doit être sensiblement constante. L'amplitude des oscillations du pendule doit donc l'être également, malgré les irrégularités d'action des engrenages; s'il n'en est pas rigoureusement ainsi, c'est qu'il existe toujours, dans le jeu de ces engrenages, certaines irrégularités qui font varier légèrement l'effort nécessaire au décrochement des palettes; mais, comme celles-ci ont une longueur relativement très-considérable, ainsi que les rayons de la double roue de repos, l'effet de ces variations sur l'étendue des arcs d'oscillation est tout à fait négligeable dans la pratique.

La roue d'échappement fonctionne, comme il est facile de le voir, avec des chutes de 60°; pour amortir les chocs sur les levées N et N', auxquels donneraient lieu des chutes aussi fortes, on munit cette roue d'un volant VV, comme dans le dispositif primitif de Denison. Toutefois, ce volant ne parvient pas à faire disparaître complétement les trépidations dues aux grandes évolutions de la roue de repos. A part cet inconvénient, dont il ne faudrait pas d'ailleurs s'exagérer l'importance, l'échappement que nous venons de décrire fonctionne d'une manière très-satisfaisante et son application aux grandes horloges a donné, en Angleterre, de très-bons résultats.

ÉCHAPPEMENTS LIBRES A FORCE CONSTANTE.

Généralités. — Les échappements libres jouissent, comme nous l'avons dit, de la précieuse propriété de permettre au régulateur de décrire son arc complémentaire, dans une indépendance complète de la force motrice. Les inégalités de cette force ne peuvent donc avoir d'influence que pendant la période, relativement très-courte, de l'impulsion. Toutefois, il est bien évident qu'il y aurait un sérieux avantage à soustraire le régulateur à l'influence de ces inégalités et à ne lui transmettre que des impulsions rigoureusement constantes. Pour atteindre ce résultat, on a proposé un grand nombre de dispositifs, dans lesquels la force motrice, au lieu d'agir plus ou moins directement sur l'échappement, par l'intermédiaire des rouages, est utilisée, d'une manière indirecte, pour remonter, par exemple, une pièce additionnelle à une hauteur constante, d'où elle descend en agissant directement sur l'échappement et tend, par suite, à imprimer au pendule des impulsions d'une certaine uniformité. Cette pièce additionnelle, dans les horloges monumentales où la force motrice est un poids, constitue ce qu'on appelle ***un remontoir d'égalité.*** Dans d'autres

cas, la force destinée à entretenir le mouvement du régulateur est fournie par un ressort spiral, qui agit sur l'échappement à l'aide d'un levier. La force motrice du rouage a pour fonction de tendre de nouveau le ressort, lorsqu'il a produit son action. On comprend, d'ailleurs, qu'on puisse varier à l'infini la forme et le mode d'action de la pièce additionnelle, et nous allons faire connaître quelques-uns des dispositifs les plus remarquables qui ont été essayés dans ces dernières années.

Remontoir d'égalité à détente de M. Henri Lepaute. — Dans les horloges monumentales, l'introduction d'un remontoir d'égalité a pour but de corriger les irrégularités de marche, dues aux incorrections des engrenages et surtout aux résistances que présente le déplacement des grandes aiguilles. Mais, comme on est réduit à employer de nouveau des engrenages, pour transmettre à l'échappement l'action de la pièce additionnelle, il en résulte que cette correction ne peut être considérée comme réellement sérieuse qu'à la condition d'apporter la plus grande précision dans l'exécution de ces organes intermédiaires. Aussi, tous les horlogers sont-ils parfaitement d'accord sur ce point qu'un rouage simple, bien compris, doit être préféré à un remontoir mal combiné ou d'une exécution imparfaite.

C'est pendant le remontage de la pièce additionnelle que se fait le mouvement des aiguilles, régularisé par un volant ; or, ce remontage, qui a lieu à des intervalles de temps plus ou moins longs, occasionne toujours une certaine incertitude dans la détermination de l'heure. Certains remontoirs ne permettent le mouvement des aiguilles que toutes les minutes, d'autres à chaque demi-minute ou quart de minute.

Le remontoir d'égalité à détente de M. Henri Lepaute a spécialement pour objet de réduire notablement les intervalles de remontage. Voici la description qu'en a donnée l'inventeur :

« Le troisième mobile de l'horloge est en communication directe avec le cylindre, portant le poids moteur, au moyen du deuxième mobile.

« Une lanterne L (*fig.* 4, Pl. V), portée par l'arbre de ce troisième mobile, engrène avec une roue R, dite intermédiaire, placée sur un arbre dont les pivots sont reçus par un coq d'acier C, appelé chariot de remontoir.

« Ce chariot est relié à un arbre, dont l'axe est dans le prolongement de celui de la roue d'échappement. L'axe de la roue intermédiaire décrit donc, dans son mouvement, un arc de cercle, dont le centre est sur l'axe de cette roue d'échappement, représentée en pointillé en *m*. La roue intermédiaire R engrène, d'autre part, avec une lanterne L′, que porte l'arbre de cette roue d'échappement. On voit ainsi que le chariot de remontoir (dont la pesanteur est équilibrée à volonté par un contre-poids P) prend un point d'appui sur le troisième mobile, qui tend constamment à le soulever ; il l'empêche de descendre, ce qu'il ferait évidemment, si la roue intermédiaire n'engrenait qu'avec la lanterne d'échappement L′.

« Le troisième mobile engrène aussi avec le pignon d'une roue S, dont l'arbre est muni du limaçon M. L'arbre, autour duquel oscille le chariot de remontoir,

porte, en prolongement du contre-poids, un levier, dont l'extrémité est reliée à un autre levier plus court, au moyen d'une petite bielle; ce second levier, dont le poids s'équilibre à volonté par le contrepoids Q, se termine par un bec *b*, contre lequel vient s'arrêter l'ergot du volant V. A côté du bec *b*, s'en trouve un autre *a*, garni d'une pierre dure et destiné à entrer dans les cinq entailles pratiquées sur la circonférence du limaçon. Au moyen de ces deux leviers, le bec parcourt une distance verticale, qui eût été insuffisante, si le levier Q*b* avait servi lui-même à arrêter l'ergot du volant V, car le remontoir fonctionnant très-souvent, la distance parcourue par le chariot et, par suite, par le levier Q*b*, est très-petite (c'est là une condition avantageuse, puisqu'elle évite la variation dans le désengrènement, qu'on a quelquefois reprochée au remontoir Lepaute).

« Supposons le bec *a* au fond de l'entaille du limaçon; le balancier (qui bat 3.000 vibrations) fera une vibration, pendant laquelle le bec sera dégagé par le mouvement de l'axe du chariot de remontoir; à ce moment, le rouage, devenu libre, puisque le bec *a* qui le retenait est sorti de l'entaille, se met à courir, et les nombres sont calculés de telle sorte qu'après cinq vibrations le volant a fait trois tours.

« De cette façon les aiguilles marchent les cinq sixièmes du temps, et, par suite, leur mouvement n'ayant rien de rapide, on ne voit plus de ces secousses, comme il s'en produit dans les remontoirs ordinaires, qui, devant parcourir souvent un quart de minute, pendant que le volant fait un demi-tour, élancent les aiguilles d'une façon telle que l'appréciation exacte de l'heure est impossible sur les grands cadrans. »

Cette courte description suffit pour faire comprendre les sérieux avantages du remontoir de M. Henri Lepaute. Nous devons ajouter pourtant que ce dispositif présente encore certains défauts, qui se rencontrent, du reste, dans presque tous les appareils de ce genre. Ainsi, le dégagement du volant consomme une certaine force et ce dégagement, qui est permanent, puisque l'arrêt n'est jamais au repos, introduit forcément une petite cause de variation; en outre, l'engrènement de la roue R avec la lanterne est défectueux, par suite de la pénétration variable des dents. Il importe, toutefois, de remarquer que la faible rotation angulaire des divers mobiles atténue ces défectuosités d'une manière notable.

Échappement à force constante et à remontoir de M. Paul Garnier. — M. Paul Garnier, qui est l'inventeur de divers échappements et, en particulier, d'un échappement libre à force constante, cité dans le corps de l'ouvrage (p. 371, t. II), a construit, dans ces dernières années, un nouvel appareil très-remarquable, qu'il a désigné sous le nom d'*échappement à force constante et à remontoir.*

Les avantages de ce dispositif, que représente la *fig.* 5, Pl. V, sont faciles à comprendre d'après la description suivante, empruntée à une note de l'auteur :

« *Composition du mécanisme.* — A, B, C, roues du rouage.

D, pignon engrenant avec la roue C et dont l'axe porte trois bras, qui font successivement arrêt en S sur la pièce M. Ce même axe porte

aussi un volant à masses, mobile sur la tige, pour amortir la force vive du rouage;

E, pignon engrenant également avec la roue C; sur la tige est monté un plateau, qui porte six chevilles;

F, cercle d'impulsion;

G, petite masse montée sur le prolongement d'un rayon horizontal de ce cercle;

HH, ancre de l'échappement, monté sur la même tige que la fourchette;

II', bras de dégagement monté sur l'ancre HH;

I', dent de dégagement de ce bras;

J, détente retenant le cercle d'impulsion F;

M, détente d'arrêt du rouage moteur;

O, cheville de dégagement de la détente M, sur le cercle d'impulsion F;

R, cheville d'impulsion montée sur le même cercle;

S, cheville d'arrêt du rouage moteur montée sur la détente M;

T, dent du cercle d'impulsion faisant arrêt sur la détente J;

V, dent du même cercle servant à la mise en place.

« *Fonctions de l'échappement.* — La *fig.* 5, représente l'échappement, lorsque le pendule est arrêté et dans la position verticale.

« Si, à ce moment, on écarte le pendule, pour l'amener vers la droite, le bras II' de dégagement, monté sur l'ancre H, passera à la droite de la détente J. Le pendule étant alors abandonné à lui-même accomplira son oscillation, de droite à gauche, la dent I' viendra rencontrer la détente J et l'écartera de sa position, de manière à dégager la dent T du cercle d'impulsion F; celui-ci, sous l'action de la masse G, tournera de gauche à droite, et la cheville R, rencontrant la levée du bec de l'ancre H, lui donnera une impulsion suffisante pour entretenir le mouvement d'oscillation du pendule.

« Au moment où la cheville R quitte le plan incliné, la cheville O rencontre la détente M, l'écarte de sa position, et dégage le bras du pignon D, qui fait repos sur cette détente, en S. Le rouage moteur se met en mouvement et, en même temps, le pignon, qui porte le disque E, dont l'une des chevilles rencontre la dent V du cercle d'impulsion et ramène ce cercle dans sa position primitive, en remettant la dent T en prise avec la détente J; puis, l'un des bras du pignon vient rencontrer la détente M, qui a repris sa position verticale, et produit ainsi l'arrêt du rouage. Le pendule continue son oscillation de droite à gauche, entièrement libre et dégagé de tout frottement; il accomplit, dans les mêmes conditions, son oscillation de gauche à droite, pour recommencer, à l'oscillation suivante, le dégagement de la détente J, et ainsi de suite.

« Cet échappement est entièrement libre; la seule résistance qu'il ait à vaincre consiste dans le dégagement de la détente J, qui dure pendant 1/4 de degré environ, et cette résistance se trouve neutralisée par la force que restitue, à ce moment, le cercle d'impulsion. Il est à force constante, car la masse G, travaillant toujours dans les mêmes conditions et sans aucun frottement, donne une impulsion toujours égale. »

TYPES D'ÉCHAPPEMENTS MODERNES POUR RÉGULATEURS DE CHEMINÉES.

Échappement Desfontaines. — Cet échappement, qui est une modification très-ingénieuse d'un dispositif inventé en 1844, par L. Gavioli, et qui est représenté *fig.* 2, Pl. VI, offre, dans ses fonctions, les carac-

tères d'un échappement libre et à force constante; les frottements y sont très-réduits et il peut marcher sans huile, tout en laissant au pendule une très-grande liberté, conditions très-favorables pour le réglage.

Description. — Les deux leviers A et B, mobiles respectivement autour des axes O et O', sont munis de deux becs articulés C et D. Le premier de ces becs sert à assurer le repos de la roue M, tandis que le second a pour fonction d'écarter périodiquement le levier B, sous l'action de la roue d'impulsion N. Les deux roues M et N sont solidaires et fixées sur le même axe. D'après le sens de rotation de ces roues, qui est indiqué par une flèche, les diverses pièces de l'échappement sont dans les positions qu'elles occupent, lorsque le pendule exécute sa demi-oscillation, vers la gauche, dans une liberté complète.

Cette oscillation terminée, le pendule revient vers sa position d'équilibre, la dépasse et atteint le levier B, qu'il écarte, jusqu'à ce qu'il soit arrivé à l'extrémité de son amplitude. Pendant cette période d'écartement, le bec D bascule par son propre poids et prend une position plus inclinée.

Lorsque le pendule marche de nouveau, en sens inverse, le levier B agit, à son tour, sur lui et lui donne une impulsion, pendant une partie de l'oscillation; à un certain moment de la course descendante, la vis V de ce levier, en rencontrant le levier A, opère le décrochement de la dent X et met la roue en liberté. A cet instant, l'extrémité du bec D se trouve placée en *a* et la roue N le remonte de *a* en *b*, en écartant le levier B jusqu'au prochain repos, qui a lieu par la rencontre de la dent X' avec le bec C, revenu à sa position d'équilibre, laquelle est déterminée par la butée du levier A sur la vis V'.

On voit, d'après cela, que le décrochement du repos et le remontage du levier B s'effectuent pendant que le pendule achève de décrire l'arc supplémentaire qui suit l'arc d'impulsion, correspondant à la descente du levier B. On voit aussi que ce levier reste écarté et arc-bouté sur la roue N, jusqu'à ce que le pendule, revenant toucher la fourchette, l'entraîne avec lui; il redescend ensuite avec le pendule et le pousse, jusqu'à ce qu'il se produise un nouveau décrochement du repos, et ainsi de suite.

Le mode de fonctionnement de cet échappement présente, comme on le voit, la plus grande analogie avec celui des échappements de gravité. Toutefois, il en diffère en ce que le pendule ne reçoit d'impulsion que de deux en deux oscillations; c'est donc un échappement à *coup perdu*.

M. Desfontaines a construit plusieurs autres échappements, qui dérivent plus ou moins de celui que nous venons de décrire. Celui que représente la *fig.* 1 (Pl. VI) est remarquable par sa simplicité. Il se compose d'une roue unique, munie de dents et de chevilles, ces dernières étant implantées perpendiculairement au limbe.

Les repos sont fixes et se font par les dents pointues sur le levier B, tandis que l'écartement du levier d'impulsion A s'opère par la friction de la cheville *n* sur la surface courbe concave, qui forme l'appendice de ce levier.

Échappement Charpentier. — Cet échappement, qui peut également être considéré comme un échappement à force constante, donne la seconde fixe avec un pendule à demi-secondes. Nous empruntons à la description qui en a été donnée par l'auteur ce qui est nécessaire pour faire comprendre le jeu de cet échappement, représenté *fig.* 3 (Pl. VI).

« L'échappement est à force constante, car la masse M, qui est fixée sur l'axe du bras L par la vis V, contribue seule à entretenir les oscillations du pendule, par l'intermédiaire du bras L.

« Le sens de la rotation de la roue indique que le pendule entraîne l'ancre ABC de gauche à droite; la dent *d* vient d'échapper du repos R, en même temps qu'une dent X de la petite roue S a commencé à agir sur le levier L (la figure la représente vers la fin de son parcours). Le rouage lève donc à lui seul le levier L et, par conséquent, la masse M, fixée sur la tige de ce levier.

« La dent *d* a parcouru l'espace compris entre deux dents et la grande roue cessera son mouvement par l'arrêt de la dent *d'* sur le repos R'; pendant ce temps, la dent X de la petite roue a produit sur le levier L une levée de 1°, et, comme elle est fixée sur la grande roue, elle se trouvera arrêtée en même temps que celle ci.

« Les deux roues restent immobiles pendant tout le temps que dure l'oscillation de gauche à droite et le levier L a cessé d'être entraîné par le pendule, sur lequel il ne pèse plus par la goupille excentrique E, portée par un bouchon à frottement dans l'ancre ABC et qui permet de l'engager à volonté.

« Le reste se comprend aisément; c'est toujours le levier L qui, d'abord, est entraîné par le pendule dans son mouvement ascensionnel et qui donne, ensuite, l'impulsion dans sa marche descendante. »

Échappement Brocot. — L'échappement Brocot, que représente la *fig.* 4, Pl. VI, est également à coup perdu et donne la seconde fixe. Les fonctions de cet échappement, qui rentre dans la catégorie des échappements de gravité, sont faciles à comprendre, d'après ce que nous avons dit précédemment.

La roue d'échappement est formée de deux roues, fixées sur le même axe et munies de dents de longueurs différentes. Les dents de la grande roue font repos sur la saillie R du levier B. Après le dégagement de la dent *d*, la roue se met à tourner et la dent *n* de la petite roue écarte, vers la droite, l'appendice pendulaire A, puis, le bec C du levier B, qui est relié

au pendule, vient en contact avec la pièce A et l'entraîne jusqu'à l'extrémité de sa course ; dans l'oscillation en sens inverse, cette pièce A agit, par son poids, sur le pendule, jusqu'à ce qu'elle soit revenue dans sa position d'équilibre, déterminée par la vis V. Elle communique donc une impulsion continue au pendule, pendant toute l'étendue de l'arc ainsi décrit, qui est supérieur à celui pendant lequel elle a été, au contraire, soulevée par ce pendule.

Échappement Bosio (*). — Cet échappement, qui est à *coup perdu*, repose en principe sur l'emploi d'un levier, terminé par un petit plan incliné, qui, par sa chute, agit directement sur un petit rouleau mobile, établi sur la tige du pendule. —Le levier, dans sa chute, agit, en même temps, sur une détente, qui produit le déclanchement d'une roue à chevilles, dont la fonction est de remonter le levier, pendant que le pendule achève sa vibration directe et exécute sa vibration rétrograde.

Description du mécanisme. — Les *fig.* 1, 2, 3 et 4, (Pl. VII), représentent cet échappement. Les deux premières figures sont de demi-grandeur, tandis que les deux autres sont de grandeur d'exécution.

a, tige de suspension du pendule.

b, petit galet, ou rouleau, monté sur un axe, fixé perpendiculairement à la tige *a*, dans un plan normal à la platine et passant par l'axe de cette tige (*fig.* 2 et 4) ; ce galet reçoit l'impulsion de la bascule d'échappement, au moyen d'un petit plan incliné *c*.

d, bascule d'échappement, terminée, à son extrémité voisine de la tige *a*, par le plan incliné *c*, qui est fixé par un retour d'équerre.

e, petit contre-poids, à l'autre extrémité de la bascule *d*, et qui tend à la relever, lorsqu'elle a perdu la position horizontale.

f, pontet, fixé à la platine et portant l'axe d'oscillation de la bascule.

g, tige verticale pouvant osciller dans un plan parallèle à la platine et munie d'une goupille, à l'aide de laquelle elle maintient la bascule horizontale, pendant son repos.

h, pontet, fixé à la platine et portant l'axe d'oscillation de la tige *g*.

i, ressort spiral monté sur cet axe et qui tend à ramener la tige *g* dans la position verticale, dès qu'elle s'en écarte.

j, levier oscillant, sur lequel tombe la bascule, lorsqu'elle quitte la position horizontale.

k, troisième pontet, fixé à la platine et portant l'axe d'oscillation de la tige *j*.

l, second ressort spiral, chargé de ramener en position la tige *j*.

m, arcade métallique fixée à la tige *a*, du même côté que le galet *b*, et au-dessus de ce galet.

n, pied-de-biche, fixé à l'intérieur de l'arcade *m* sur un axe *o*, autour duquel il peut tourner; il a pour fonction d'écarter, à des intervalles égaux, la tige *g* de la position verticale et, par conséquent, de déclancher la bascule *d*, que soutient cette tige.

(*) Cet échappement, soumis à la Société d'Encouragement, en 1866, a été l'objet d'un rapport très-favorable et a valu à son inventeur une médaille de platine.

p, arrêt, placé sous la branche supérieure du pied-de-biche *n* et disposé de telle sorte que ce pied de biche ne peut quitter la position qu'il occupe (*fig.* 3) que pour se relever.

q, roue de compte, mise en mouvement par la bascule *d*.

Mode de fonctionnement de l'échappement. — Supposons le pendule mis en mouvement et commençant son oscillation à gauche de la verticale, comme l'indique la *fig.* 1; à ce moment, la bascule d'échappement est au repos, le plan incliné *c* reposant sur la goupille de la tige *g*.

Avant que le pendule ne soit passé à droite de la verticale, la branche inférieure du pied-de-biche rencontre la tête de la tige *g*, contre laquelle elle vient buter, en la repoussant de gauche à droite; aussitôt que cette tige s'écarte de sa position d'équilibre, le plan incliné *c* n'étant plus soutenu, la bascule *d* descend instantanément et le pendule achève son oscillation, en recevant une impulsion, produite par le frottement du plan incliné sur le rouleau *b*; les divers organes sont alors disposés comme l'indique la *fig.* 3.

Dès que la tige *g* et la bascule *d* ont abandonné leurs positions respectives, elles tendent à les reprendre immédiatement, sous l'action des ressorts *i*, *l* et du levier *j*, et, quand le pendule repasse de droite à gauche, le pied-de-biche se relève et glisse sur la tête de la tige *g*, sans l'écarter de la position verticale et, par suite, sans faire tomber la bascule *d*. Au début de l'oscillation suivante, de gauche à droite, les différentes pièces se retrouvent donc dans les positions représentées par la *fig.* 1 et fonctionnent, par conséquent, comme nous l'avons indiqué.

L'impulsion transmise au pendule est ici rigoureusement constante, puisqu'elle est due uniquement au poids du levier, tombant toujours de la même hauteur. La force motrice, qui anime le rouage, n'est employée qu'à remonter le levier impulseur à la position invariable d'où il doit tomber, à chaque double oscillation. La force motrice du barillet, qui est nécessairement variable, ne se traduit que par des variations dans les vitesses de remontage du levier, vitesses qui sont d'ailleurs toujours suffisantes, pour que ce remontage soit effectué dans la période de temps, pendant laquelle le pendule oscille en parfaite liberté et qui correspond aux 7/8 de sa course (*).

Échappement V. Fleury. — M. V. Fleury est l'inventeur d'un échap-

(*) L'échappement Bosio repose, comme on le voit, sur une idée analogue à celle de l'échappement Garnier, que nous avons précédemment décrit, mais il en diffère essentiellement par la disposition et le mode de fonctionnement; dans l'échappement Bosio, c'est le poids d'un levier, qui, par sa chute, agit directement sur la tige du pendule, tandis que, dans celui de M. Garnier, c'est l'action d'un contre-poids qui est transmise à cette tige, à l'aide d'un ancre et d'une fourchette, comme dans les horloges ordinaires. L'introduction de ces organes intermédiaires paraît de nature à donner lieu à des frottements un peu plus considérables que celui du plan incliné sur le rouleau.

pement qui porte son nom et auquel il a donné plusieurs dispositions très-ingénieuses. Nous nous bornerons à en indiquer ici quelques-unes, en renvoyant pour les autres à une brochure de l'auteur, où elles sont décrites avec beaucoup de détails (*).

La pièce principale de toutes ces variantes d'échappement est une petite bascule d'impulsion (*fig.* 5, Pl. VI), qui est appliquée de différentes manières, suivant les fonctions qu'on veut lui faire remplir. C'est ainsi, par exemple, qu'elle peut recevoir directement les repos du rouage, au moyen d'un disque (*fig.* 6) ou d'un petit volant (*fig.* 7). Dans d'autres dispositions, comme celle de la *fig.* 8, cette bascule, après avoir donné l'impulsion au pendule, dégage une pièce disposée pour arrêter le rouage.

La *fig.* 6 représente l'échappement recevant les repos du rouage, avec lequel il est en contact. Pour annuler à peu près complétement l'influence des variations de ce rouage, on doit placer le plot d'arrêt T à une faible distance du point de rotation de la bascule, de manière à ce que ce plot ne se déplace que d'une quantité très-faible, et, en second lieu, réduire, le plus possible, l'intensité de la pression exercée par le rouage, en le terminant par un disque à longs bras X (*fig.* 6) ou en faisant faire les repos par un petit volant X (*fig.* 7).

Dans la *fig.* 6, le disque X porte, à une faible distance de son centre, quatre petites goupilles, qui, dans le mouvement de rotation du disque, agissent successivement sur un bras de la bascule, pour la remonter. Le même disque porte également, à l'extrémité de chacun de ses rayons, deux petites chevilles, qui font arrêt sur le plot T de la bascule. Les goupilles de remontage et les chevilles d'arrêt présentent, dans leur disposition, comme il est facile de le voir, la plus grande analogie avec les organes du même genre, dans les échappements dits de gravité. L'introduction de deux chevilles, au lieu d'une seule, a pour but de faire *perdre des temps* à l'écoulement du rouage. La première de ces chevilles fait son appui sur le plot T, quand la bascule a été remontée par l'une des goupilles du disque et que le pendule la pousse devant lui ; dans ce mouvement d'écartement de la bascule, la première cheville finit par échapper au plot, sur lequel elle est remplacée par la seconde, qui y reste jusqu'à la fin de l'impulsion, c'est-à-dire jusqu'à ce que la bascule soit revenue sur l'arrêt G, qui règle sa descente.

Le disque doit parcourir ainsi un petit espace, pour que la seconde cheville vienne remplacer la première, et cet espace doit être tel que la bascule, en descendant avec le pendule, puisse échapper à la goupille qui l'avait remontée et sur laquelle elle était restée suspendue. Elle se trouve ainsi dégagée et peut, par suite, donner l'impulsion au pendule.

(*) Cette brochure a pour titre *Du parfait échappement que demande le pendule*, et se trouve chez l'auteur, M. Fleury, horloger, rue de la Paix, 23, Paris.

Dans la position représentée sur la *fig.* 6, le disque achève de remonter la bascule et la première cheville est sur le point d'atteindre le plot d'arrêt T.

Dans la disposition de la *fig.* 7, les repos ont lieu sur la bascule, par l'intermédiaire d'un petit volant, qui termine le rouage. De plus, la bascule se trouve munie d'une petite *surprise*, servant à la retenir suspendue sur la goupille qui l'a remontée.

Cette surprise, qui peut recevoir différentes formes, se prête à la solution de plusieurs questions : elle permet de rendre l'échappement indépendant du rouage, pendant ses relations avec le pendule; elle supprime l'espace à parcourir par le rouage, ou *temps perdu;* elle permet, en outre, d'avoir les secondes fixes avec le pendule à demi-seconde, ou même avec celui à quart de seconde, d'obtenir des horloges à longue marche avec un rouage simple, etc. Pour ces derniers emplois de la surprise, nous renverrons à la brochure de l'auteur et nous nous bornerons à la description du dispositif de la *fig.* 7.

Dans la position des pièces représentées par cette figure, la bascule A est parvenue à la ligne 2; grâce à la surprise S, établie au tiers de sa longueur, elle est restée suspendue sur la goupille, qui l'a remontée de la ligne 1 à la ligne 2; le rouage ne peut plus continuer son mouvement, par suite de la rencontre du volant X qui le termine, avec la cheville du petit bras B de la bascule. Tant que cet arrêt subsiste, le rouage et l'échappement sont complétement en repos.

Mais, lorsque le pendule, dans son mouvement d'oscillation, arrivera à la ligne 2 et poussera la bascule vers la ligne 3, la surprise S finira par se dégager de la goupille qui l'avait remontée, et la bascule, en descendant avec le pendule, pourra librement passer la ligne 2 et accompagner le pendule jusqu'à la ligne 1. En ce moment, le volant ne se trouvant plus arrêté par la goupille du bras B, le rouage pourra tourner et remonter de nouveau la bascule de 1 à 2; dans cette position, le volant viendra rencontrer la goupille du bras B et les pièces se retrouveront dans la position représentée sur la figure.

L'impulsion, comme on le voit, a lieu seulement à chaque double oscillation du pendule et elle se produit pendant tout le temps que la bascule, en descendant avec le pendule, met à parcourir l'espace de 2 à 1.

La *fig.* 8 représente une disposition propre aux échappements visibles des régulateurs de cheminées. La pièce d'arrêt T y forme une moitié d'ancre, dont l'autre moitié serait composée de la bascule A, terminée par une surprise S. Le jeu de cet échappement se comprend de lui-même. Il est facile de voir, du reste, qu'il présente beaucoup d'analogie avec certains dispositifs de régulateurs de cheminées que nous avons déjà décrits, et, en particulier, avec celui de M. Desfontaines (*fig.* 1, Pl. VI).

CHAPITRE II.

RÉGULATEURS DES PIÈCES D'HORLOGERIE.

CONSIDÉRATIONS GÉNÉRALES.

A part une ou deux exceptions, le régulateur employé dans les pièces d'horlogerie se compose, en principe, d'un corps solide, animé, autour d'un axe fixe, d'un mouvement circulaire alternatif ou oscillatoire.

Dans les horloges ou chronomètres fixes, ce régulateur est un *pendule* ou *balancier rectiligne;* dans les chronomètres portatifs, c'est un *balancier circulaire.* Le pendule fonctionne sous l'influence de la pesanteur, tandis que le balancier circulaire doit son mouvement à l'élasticité d'un ressort spiral, auquel il est associé.

Dans tout régulateur d'horlogerie, *la durée d'une oscillation* (c'est-à-dire le temps qui sépare deux positions consécutives, pour lesquelles la vitesse s'annule) doit être indépendante de l'*amplitude* ou de l'arc décrit. Cette condition fondamentale constitue ce qu'on appelle l'*isochronisme.* Nous verrons plus loin dans quelles circonstances et par quels moyens se trouve réalisée pratiquement cette condition, indispensable pour le but qu'on se propose d'atteindre, au moyen des chronomètres, c'est-à-dire pour la mesure du temps.

Les principes théoriques, sur lesquels repose l'emploi du pendule et du balancier, ont été exposés dans l'ouvrage de Moinet et s'y trouvent accompagnés de tous les détails historiques qui peuvent être de quelque intérêt pour le lecteur. Nous nous bornerons donc ici à rappeler ces notions, en les complétant sur quelques points particuliers et en indiquant, avec les développements que comporte leur importance, les expériences et les applications faites depuis la publication de la seconde édition de cet ouvrage.

DU PENDULE.

Pendule simple. — Les propriétés du pendule, tel qu'on l'emploie dans l'horlogerie, peuvent se déduire assez simplement de celles du *pendule théorique,* ou *pendule simple* des géomètres, qui serait constitué par un point matériel pesant, suspendu à un fil, supposé parfaitement flexible et sans pesanteur. Dans l'état de repos, la direction de ce fil coïncide avec

celle de la verticale. En supposant ce pendule soustrait à toute influence autre que celle de la pesanteur, si l'on vient à l'écarter de la verticale d'un certain angle et qu'on l'abandonne ensuite à lui-même, il reviendra d'abord à sa position initiale, c'est-à-dire à la verticale, en décrivant un arc de cercle, puis, en vertu de sa vitesse acquise, il la dépassera et décrira, au delà, un arc de cercle, précisément égal au premier. On sait, en effet, qu'un corps pesant, animé d'une certaine vitesse, n'arrive à une vitesse nulle qu'après s'être élevé verticalement d'une hauteur rigoureusement égale à celle dont il aurait dû tomber, en partant du repos, pour acquérir cette même vitesse sous l'action de la pesanteur. Le pendule se trouvant alors, par rapport à la verticale, dans une position symétrique de celle qu'il occupait, après son premier écart, le mouvement recommencera en sens inverse et se reproduira ainsi indéfiniment, en donnant lieu à une série d'oscillations alternatives, qui seront toutes d'égale amplitude, si, comme nous l'avons supposé, le point matériel est uniquement soumis à l'action de la pesanteur.

Ce pendule idéal ne peut évidemment pas être réalisé, mais on s'en rapproche, autant que possible, en formant un pendule d'une petite boule de platine, suspendue à un fil de pite. Sous la latitude de Paris, un semblable pendule, oscillant dans le vide, fait *une oscillation par seconde*, lorsque sa longueur, mesurée du point de suspension du fil au centre de la petite boule, est égale à $0^{m}993845$, ou approximativement $0^{m},994$.

Durée d'une oscillation. — La durée d'une oscillation dépend de la longueur du pendule, de l'intensité de la pesanteur et de l'amplitude de l'oscillation.

Si l'on désigne par T cette durée, par λ la longueur du pendule simple, par g l'intensité de la pesanteur, pour un lieu déterminé (à Paris $g=9,801$), par α la demi-amplitude et par π le rapport de la circonférence au diamètre, on démontre, en mécanique, que ces différentes quantités satisfont à la relation :

$$T=\pi\sqrt{\frac{\lambda}{g}}\left[1+\left(\frac{1}{2}\right)^2\sin^2\frac{\alpha}{2}+\left(\frac{1.3}{2.4}\right)^2\sin^4\frac{\alpha}{2}+\ldots\right].$$

Dans cette formule, tous les termes, entre parenthèses, vont en décroissant très-rapidement, à partir du second, et peuvent être négligés sans erreur sensible ; comme, de plus, pour une valeur suffisamment petite de l'amplitude, le sinus peut être remplacé par l'arc, il en résulte qu'on peut écrire, avec une très-grande approximation :

$$T=\pi\sqrt{\frac{\lambda}{g}}\left(1+\frac{\alpha^2}{16}\right). \qquad (1)$$

Cette relation montre que la durée de l'oscillation dépend, dans une

certaine mesure, de l'amplitude. Toutefois, il est facile de voir que, lorsque cette amplitude reste comprise dans les limites qu'on admet ordinairement pour les chronomètres, son influence est très-faible. Si nous prenons une amplitude de 8°, par exemple, qui peut être considérée comme une limite supérieure, la demi-amplitude α sera de 4° et l'arc correspondant sera égal à $\frac{4}{360} \times 2\pi$ ou 0,07. Le terme $\frac{\alpha^2}{16}$ aura, par suite, pour valeur $\frac{\overline{0,07}^2}{16}$ ou $\frac{1}{3267}$.

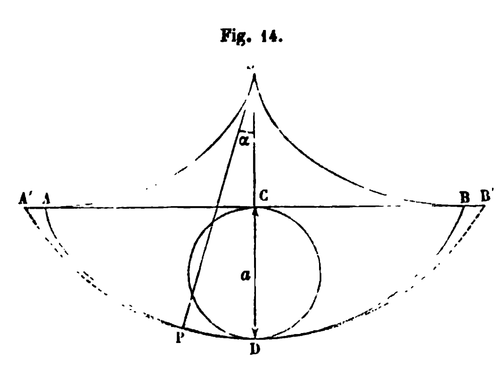
Si nous supposons maintenant que, pour la même longueur de pendule, l'amplitude ne soit que de 6°, la valeur correspondante du terme $\frac{\alpha^2}{16}$ sera représentée par $\frac{\overline{0,0525}^2}{16}$ ou $\frac{1}{5800}$. La différence entre les durées des deux oscillations, pour ces deux amplitudes de 8° et de 6°, serait donc donnée par la différence de ces deux fractions, c'est-à-dire qu'elle serait inférieure à $\frac{1}{7500}$.

On voit, d'après cela, que pour des valeurs suffisamment petites de l'amplitude, on peut, dans l'expression de la durée de l'oscillation, négliger le terme qui représente l'influence de l'amplitude, et cette durée est alors donnée avec une très-grande approximation par la formule simple :

$$T = \pi \sqrt{\frac{\lambda}{g}}. \qquad (2)$$

Pendule cycloïdal. — Le pendule simple, formé d'un point matériel pesant, suspendu à un fil parfaitement flexible et sans pesanteur, ne peut être considéré comme isochrone qu'autant que l'amplitude des oscillations est suffisamment faible. Huyghens qui, le premier, a constaté cette influence de l'amplitude sur la durée des oscillations, a montré, en même temps, qu'on pouvait arriver à l'isochronisme rigoureux des oscillations, quelle que soit l'amplitude, à la condition d'obliger le point matériel à décrire, de part et d'autre de la verticale, un arc de cycloïde (*). Si l'on imagine une courbe

Fig. 14.



(*) Si l'on suppose qu'un cercle tangent à une droite roule sur cette droite, sans glisser, le point du cercle, qui, à l'origine, était le point de contact, décrira, dans ce mouvement, une

de cette espèce ADB, dont le cercle générateur ait pour diamètre la moitié de la longueur λ qu'on veut donner à la tige du pendule, et si, après avoir pris $CS = CD = \frac{\lambda}{2}$, on trace, de S en A et de S en B, deux demi-cycloïdes semblables à la première, il suffira de choisir le point S comme centre d'un pendule, dont la tige flexible puisse s'appliquer sur ces deux demi-cycloïdes, supposées solides, pour obtenir un pendule cycloïdal, qui, pour toutes les amplitudes, sera isochrone et pour lequel la durée d'une oscillation sera rigoureusement donnée par la relation :

$$T = \pi\sqrt{\frac{2a}{g}} = \pi\sqrt{\frac{\lambda}{g}},$$

λ représentant la longueur de la tige flexible du pendule.

Pour des amplitudes suffisamment faibles, l'arc de cycloïde DP se confond avec l'arc de cercle décrit du point S, avec le rayon $SD = \lambda$; le pendule simple, de longueur λ, peut alors être identifié au pendule cycloïdal, et, par suite, la durée de l'oscillation est représentée par l'expression précédente, indépendante de l'amplitude. Mais, à partir du point où la cycloïde et le cercle décrit du point S s'écartent assez l'un de l'autre, pour qu'on ne puisse plus les confondre, le pendule simple retarde sur le pendule cycloïdal, et cela d'une quantité d'autant plus forte que l'écart entre les deux courbes est plus prononcé, c'est-à-dire que l'amplitude est plus grande. C'est ce qui résulte également de la formule (1), qui montre que la durée de l'oscillation augmente en même temps que l'amplitude.

Pour réaliser pratiquement son pendule cycloïdal, Huyghens eut l'idée de former la suspension de fils de soie ou de lames très-flexibles, qu'il faisait fléchir sur deux surfaces métalliques, dont la section se composait de deux demi-cycloïdes, tracées, comme nous venons de le voir, d'après la longueur de la suspension du pendule. Mais les résultats obtenus furent médiocres. Les effets de dilatation, les frottements, les adhérences résultant des contacts, etc., donnèrent lieu à des irrégularités supérieures à celles qu'on voulait éviter, et l'on fut ainsi conduit à revenir au pendule libre, dans lequel les arcs décrits sont des arcs de cercle.

Tableau des longueurs du pendule simple. — Avant d'aborder l'étude du *pendule composé*, tel qu'on l'emploie dans l'horlogerie, il convient de donner ici un tableau des longueurs du pendule simple, en fonction du nombre d'oscillations par heure. Ce tableau a été calculé au moyen de la for-

courbe, qu'on a désignée sous le nom de *cycloïde*. En remplaçant la droite fixe par un cercle, la courbe, obtenue de la même manière, devient un *épicycloïde*, lorsque le cercle mobile est à l'extérieur du cercle fixe, une *hypocycloïde*, lorsqu'il est à l'intérieur, etc. Toutes ces courbes jouent un rôle important dans la théorie des engrenages.

mule (2), convenablement transformée. T désignant, dans cette formule, la durée d'une oscillation, exprimée en secondes, si l'on désigne par N le nombre d'oscillations par heure, on aura $T = \frac{3600}{N}$; par la substitution de cette expression de T, la formule (2) devient :

$$\frac{3600}{N} = \pi \sqrt{\frac{\lambda}{g}},$$

ou

$$N = \frac{3600}{\pi} \sqrt{\frac{g}{\lambda}}.$$

En remplaçant π par sa valeur 3,14159... et g par 9,801, intensité de la pesanteur à la latitude de Paris, on obtient :

$$N = \frac{3588,9}{\sqrt{\lambda}}, \qquad (3)$$

la longueur λ étant rapportée au mètre.

On déduit de là également, pour la valeur de λ en fonction de N :

$$\lambda = \frac{12880338}{N^2}. \qquad (4)$$

Ces deux formules permettent de calculer facilement le nombre d'oscillations que fait un pendule simple, de longueur donnée, ou inversement la longueur que doit avoir un pendule, pour fournir un nombre d'oscillations déterminé. Mais, dans la plupart des cas, on peut s'en dispenser en ayant recours au tableau suivant, qui a été établi précisément au moyen de ces formules :

Tableau des longueurs du pendule simple.

Nombre d'oscillations par heure.	Longueur du pendule.	Variation de longueur pour 1 minute en 24 heures.	Nombre d'oscillations par heure.	Longueur du pendule.	Variation de longueur pour 1 minute en 24 heures.	Nombre d'oscillations par heure.	Longueur du pendule.	Variation de longueur pour 1 minute en 24 heures.	Nombre d'oscillations par heure.	Longueur du pendule.	Variation de longueur pour 1 minute en 24 heures.
	mètres.	millim.		mètres.	millim.		mètres.	millim.		mètres.	millim.
20.000	0,0322	0,04	8.3co	0,1870	0,25	5.700	0,3964	0,54	3.350	1,1477	1,60
19.000	0,0357	0,05	8.200	0,1915	0,26	5.600	0.4107	0,56	3.300	1,1828	1,64
18.000	0,0398	0,05	8.100	0,1963	0,27	5.500	0,4258	0,58	3.250	1,2194	1,69
17.000	0,0446	0,06	8.000	0,2013	0,27	5.400	0,4400	0,60	3.200	1,2578	1,75
16.000	0,0500	0,07	7.900	0,2064	0,28	5.300	0,4585	0,62	3.150	1,2981	1,80
15.000	0,0573	0,08	7.800	0,2117	0,29	5.200	0,4763	0,65	3.100	1,3403	1,86
14.000	0,0657	0,09	7.700	0,2172	0,30	5.100	0,4952	0,67	3.050	1,3846	1,93
13.000	0,0662	0,10	7.600	0,2230	0,30	5.000	0,5152	0,70	3.000	1,4312	1,99
12.000	0,0895	0,12	7.500	0,2290	0,31	4.900	0,5365	0,73	2.900	1,5316	2,13
11.000	0,1065	0,14	7.400	0,2352	0,32	4.800	0,5591	0,76	2.800	1,6429	2,28
10.000	0,1288	0,18	7.300	0,2417	0,33	4.700	0,5831	0,79	2.700	1,7669	2,46
9.900	0,1314	0,18	7.200	0,2485	0,34	4 600	0,6087	0,83	2 600	1,9054	2,65
9.800	0,1341	0,18	7.100	0,2555	0,35	4.500	0,6361	0,86	2.500	2,0609	2,87
9.700	0,1369	0,19	7.000	0,2629	0,36	4.400	0,6653	0,90	2.400	2,2362	3,11
9.600	0,1398	0,19	6.900	0,2705	0,37	4 300	0,6967	0,95	2.300	2,4349	3,38
9.500	0,1427	0,19	6.800	0,2786	0,38	4.200	0,7302	0,99	2.200	2,6612	3,70
9.400	0,1458	0,20	6.700	0,2869	0,39	4.100	0,7662	1,04	2.100	2,9207	4,06
9 300	0,1489	0,20	6.600	0,2957	0,40	4.000	0,8050	1,09	2.000	3,2201	4,48
9.200	0,1522	0,21	6.500	0,3049	0,41	3.900	0,8468	1,15	1.900	3,5680	5,00
9.100	0,1555	0,21	6.400	0,3145	0,43	3.800	0,8920	1,21	1.800	3,9750	5,50
9.000	0,1590	0,22	6.300	0,3245	0,44	3.700	0,9400	1,28	1.700	4,4570	6,20
8.900	0,1626	0,22	6.200	0,3351	0,46	3.600	0,9939	1,38	1.600	5,0310	7,00
8.800	0,1663	0,23	6.100	0,3462	0,47	3,550	1,0221	1,42	1.500	5,7250	8,00
8.700	0,1702	0,23	6.000	0,3578	0,48	3.500	1,0515	1,46	1.400	6,5720	9,10
8.600	0,1737	0,24	5.900	0,3700	0,50	3.450	1,0822	1,50	1.300	7,6220	10,60
8.500	0,1783	0,24	5.800	0,3829	0,52	3.400	1,1143	1,55	1.200	8,9450	12,40
8.400	0,1825	0,25									

Outre la longueur du pendule, pour un nombre d'oscillations donné, ce tableau fait encore connaître la variation que doit subir cette longueur, pour produire une différence de 1 minute en 24 heures.

Cette correction se déduit facilement des formules précédentes. A cet effet, remarquons qu'une différence de 1 minute en 24 heures correspond à 2ˢ,5 en 1 heure. D'un autre côté, pour un pendule de longueur λ, faisant N oscillations par heure, on a :

$$NT = N\pi \sqrt{\frac{\lambda}{g}} = 3600.$$

Si l'on veut que ce pendule retarde de 2ˢ,5 par heure, il faudra donner à sa tige une longueur λ', plus grande que λ et pour laquelle la durée d'une oscillation T' sera également supérieure à T ; la différence T' — T entre ces deux durées, multipliée par le nombre d'oscillations N, devra donner précisément le retard, c'est-à-dire qu'on devra poser :

$$N(T' - T) = 2,5 \quad \text{ou} \quad NT' = NT + 2,5.$$

D'un autre côté, on a, comme précédemment, entre N, T' et λ', la relation :

$$NT' = N\pi \sqrt{\frac{\lambda'}{g}},$$

et, par suite :

$$N\pi \sqrt{\frac{\lambda'}{g}} = NT + 2{,}5 = 3600 + 2{,}5.$$

De cette relation et de la première on déduit, en divisant membre à membre et en supprimant les facteurs communs :

$$\frac{\sqrt{\lambda'}}{\sqrt{\lambda}} = \frac{3600 + 2{,}5}{3600},$$

ou, en élevant au carré les deux membres :

$$\frac{\lambda'}{\lambda} = \frac{(3600 + 2{,}5)^2}{(3600)^2},$$

ou encore :

$$\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} = \frac{(3600 + 2{,}5)^2 - (3600)^2}{(3600)^2} = \frac{3600 \times 2 \times 2{,}5}{(3600)^2} + \left(\frac{2{,}5}{3600}\right)^2 =$$
$$= \frac{1}{720} + \frac{1}{4}\left(\frac{1}{720}\right)^2 = \frac{1}{720}\left[1 + \frac{1}{4} \times \frac{1}{720}\right].$$

Dans le facteur entre parenthèses on peut négliger, par rapport à l'unité, le second terme, qui ne dépasse guère $\frac{1}{3000}$, et l'on peut prendre, par conséquent :

$$\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda} = \frac{1}{720}.$$

Or, $\frac{\lambda' - \lambda}{\lambda}$ est le rapport de l'allongement à la longueur. Donc, pour produire un retard de 1 minute par 24 heures, il suffit de donner à la tige du pendule un allongement égal à $\frac{1}{720}$ de sa longueur primitive.

Dans le cas où, au lieu d'un retard, on voudrait produire une avance de 1 minute en 24 heures, le raccourcissement serait donné par une formule analogue :

$$\frac{\lambda - \lambda''}{\lambda} = \frac{1}{720}\left(1 - \frac{1}{4}\,\frac{1}{720}\right).$$

La seule différence consiste dans le signe du second terme entre parenthèses; mais, comme ce terme est négligeable par rapport à l'unité, on

peut dire encore que, pour l'avance dont il s'agit, le raccourcissement doit être $\frac{1}{720}$ de la longueur primitive du pendule.

Il est facile de déterminer, d'après cela, la variation que produit, pour la marche, un changement de température. Supposons, par exemple, un pendule avec une tige, formée d'un fil d'acier, dont le coefficient de dilatation est de 0,000012 environ pour 1°; si la température augmente de 20°, l'allongement relatif de la tige sera de 0,00024 et le retard produit, en 24 heures, de $60^s \times \frac{0,00024}{\frac{1}{720}}$, ou 10 secondes environ.

PENDULE COMPOSÉ OU MATÉRIEL.

Le pendule simple, tel que nous l'avons défini, ne peut pas être utilisé directement comme régulateur dans l'horlogerie. Pour les usages de cette industrie, il est indispensable d'avoir une masse d'un poids assez considérable, qui exige, par suite, une tige de suspension suffisamment forte. La nécessité de compenser le pendule, c'est-à-dire de le disposer de manière à le soustraire à l'influence des variations de température, vient encore, pour une classe spéciale d'appareils, augmenter, dans une très-grande proportion, le poids que devrait avoir la tige, si elle n'avait à résister qu'aux efforts de traction.

L'action de la tige ne pouvant pas être négligée, la longueur du pendule composé n'est plus déterminée, comme dans le pendule simple, par la distance du centre de suspension au centre de gravité de la masse pesante. Mais, quelle que soit la forme d'un pendule composé, il est toujours possible d'imaginer un pendule simple qui oscillerait dans le même temps que lui. La longueur du pendule composé est la longueur de ce pendule simple *synchrone*.

Nous allons indiquer la formule qui fournit cette longueur, en fonction des divers éléments du pendule composé. La solution de ce problème présente évidemment une très-grande importance, puisqu'elle doit permettre d'appliquer à ce dernier pendule les résultats trouvés pour le pendule simple, à la condition de leur faire subir les corrections dues aux frottements et à la résistance de l'air.

Détermination de la longueur du pendule composé. — Imaginons un corps solide, de masse M, mobile autour d'un axe horizontal, projeté en O (*fig.* 15). Ce corps a pour centre de gravité le point G, qui, dans la position d'équilibre, se trouve situé dans le plan vertical mené par l'axe O. Considérons un élément matériel m, situé à une distance r de l'axe et imprimons à tout le système un mouvement angulaire égal à α. Le centre de gravité G viendra en G′, le point m en m'. Tous les éléments

matériels, qui composent le corps, se déplaceront ainsi de l'angle α, en conservant leurs positions relatives. Si ces éléments étaient liés isolément à l'axe de suspension, par des fils flexibles non pesants, et que chacun d'eux pût osciller indépendamment des autres, ils formeraient autant de pendules simples, de diverses longueurs, et leurs oscillations n'auraient pas la même durée. Ceux qui seraient plus rapprochés de l'axe de suspension iraient plus vite, les autres plus lentement. Par conséquent, lorsque tous les éléments sont reliés entre eux, en constituant ainsi un pendule composé, il faut, pour qu'ils oscillent tous de même, que le mouvement des uns soit ralenti et celui des autres accéléré par leur dépendance mutuelle. Entre les premiers et les derniers, il doit y avoir certains éléments dont le mouvement n'est ni ralenti ni accéléré et qui oscillent de la même manière que s'ils étaient seuls. Tous ces éléments se trouvent naturellement à la même distance de l'axe de suspension, et c'est cette distance qui constitue la longueur du pendule composé. Pour arriver à l'expression mathématique de cette longueur, il est nécessaire d'introduire ici un élément nouveau.

Fig. 15.

Si on fait le produit de la masse m de chaque élément par le carré r^2 de sa distance à l'axe de suspension O, et qu'on prenne la somme de ces produits, pour tous les éléments du corps, la quantité Σmr^2, ainsi obtenue, est ce qu'on appelle le ***Moment d'inertie*** de ce corps, par rapport à l'axe O. Cette définition établie, on démontre, en mécanique, que la durée T d'une oscillation, pour le pendule composé, tel que nous venons de l'imaginer, est donnée, avec une très-grande approximation, lorsque α est suffisamment petit, par la relation :

$$T_1 = \pi \sqrt{\frac{\Sigma mr^2}{Mgl}} \left(1 + \frac{\alpha^2}{16}\right).$$

La formule que nous avons trouvée, pour le pendule simple, de longueur λ, dans les mêmes conditions d'approximation, est :

$$T = \pi \sqrt{\frac{\lambda}{g}} \left(1 + \frac{\alpha^2}{16}\right).$$

Pour que ce pendule simple soit le pendule synchrone du précédent, il faut et il suffit que les valeurs de T_1 et de T soient égales, c'est-à-dire qu'on ait :

$$\pi \sqrt{\frac{\Sigma mr^2}{Mgl}} = \pi \sqrt{\frac{\lambda}{g}},$$

ou

$$\lambda = \frac{\Sigma mr^2}{Ml}.$$

Cette expression montre que la longueur du pendule composé est représentée par une fraction, dont le numérateur est le moment d'inertie de toute la masse, par rapport à l'axe de suspension, et le dénominateur le produit de cette masse par la distance de son centre de gravité au même axe.

Si sur la ligne OG (*fig.* 16), on prend, à partir du point O, une longueur égale à λ et que, par le point ainsi obtenu, on mène une parallèle à l'axe O, tous les éléments matériels du pendule, qui se trouvent situés sur cette parallèle, se meuvent comme s'ils étaient complétement indépendants des autres éléments, propriété qui a fait donner à cette ligne le nom d'*axe d'oscillation.*

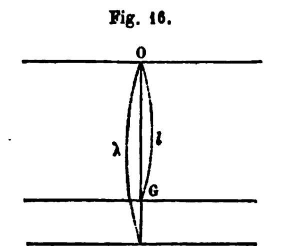
Le point déterminé par l'intersection de l'axe d'oscillation et du plan vertical passant par le centre de gravité, porte le nom de *centre de percussion.* Si l'on appliquait en ce point une percussion, dirigée perpendiculairement à la tige du pendule, cette percussion ne développerait aucune pression sur l'axe de suspension, c'est-à-dire qu'elle produirait le maximum d'effet, au point de vue du mouvement du pendule.

Si l'on prend le moment d'inertie de la masse M par rapport à une parallèle à l'axe de suspension, menée par le centre de gravité G, et qu'on désigne ce nouveau moment d'inertie par $\Sigma mr'^2$, il existe, entre les deux moments d'inertie, la relation :

$$\Sigma mr^2 = \Sigma mr'^2 + Ml^2.$$

Si, dans l'expression précédente de λ, on remplace Σmr^2 par sa valeur, on a :

Fig. 16.



$$\lambda = \frac{\Sigma mr'^2 + Ml^2}{Ml},$$

D'où l'on déduit :

$$l(\lambda - l) = \frac{\Sigma mr'^2}{M}.$$

Comme le second membre a une valeur déterminée, cette relation exprime que *le produit des distances au centre de gravité des axes de suspension et d'oscillation est constant.* Par conséquent, si ce dernier axe était pris comme axe de suspension, le premier deviendrait l'axe d'oscillation correspondant; c'est ce que l'on exprime en disant que les axes de suspension et d'oscillation sont *réciproques.*

Cette propriété constitue le théorème d'Huyghens. On en conclut facilement que si deux axes parallèles, dont le plan contient le centre de gravité, sont tels qu'en prenant successivement chacun d'eux comme axe de suspension, le pendule oscille dans le même temps, la distance de ces axes est précisément égale à la longueur du pendule composé.

La longueur λ du pendule composé peut s'obtenir, comme nous l'avons vu, en calculant le moment d'inertie de toute la masse en mouvement et en divisant la valeur obtenue par le produit de cette masse et de la distance du centre de gravité à l'axe de suspension.

Mais ce calcul est assez compliqué, lors même que le pendule a une forme simple. Ainsi, par exemple, supposons qu'il s'agisse d'un pendule formé par un fil fin, de longueur L (*fig.* 17), et une sphère de rayon R.

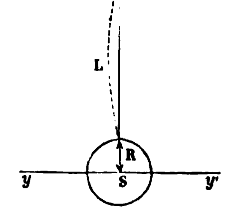


Fig. 17.

Dans la formule

$$\lambda = \frac{\Sigma mr^2}{Ml},$$

Le numérateur est la somme des moments d'inertie, par rapport à l'axe de suspension, des deux parties qui composent le pendule, c'est-à-dire le fil et la sphère.

Le moment d'inertie de la sphère, par rapport à l'axe xx', est égal au moment d'inertie par rapport à l'axe yy' (parallèle à xx' menée par son centre), augmenté du produit de la masse M' de la sphère par le carré de la distance SO. On a ainsi, pour la sphère : $\frac{2}{5}M'R^2 + M'(L+R)^2$.

En désignant par M'' la masse du fil, son moment d'inertie est représenté par $\frac{M''L^2}{3}$.

On a d'ailleurs :

$$Ml = M'(L+R) + \frac{M''L}{2}.$$

La formule, qui donne λ, devient alors, par la substitution de toutes ces valeurs :

$$\lambda = \frac{\frac{2}{5}M'R^2 + M'(L+R)^2 + \frac{M''L^2}{3}}{M'(L+R) + \frac{M''L}{2}}. \qquad (a)$$

Dans le cas où la masse M'' du fil serait assez faible, par rapport à M', pour être complétement négligeable, cette expression se simplifierait et l'on aurait :

$$\lambda = L + R + \frac{2}{5}\frac{R^2}{L+R}.$$

La formule (*a*), qui correspond à la forme de pendule la plus simple qu'on puisse imaginer, est, comme on le voit, assez compliquée. Le calcul présenterait naturellement des difficultés bien plus considérables,

s'il s'agissait des formes qu'on rencontre habituellement dans la pratique. Pour ce motif, il est préférable de recourir à une détermination expérimentale, en s'appuyant sur les considérations précédentes et, en particulier, sur le théorème d'Huygens, relatif à la réciprocité des axes de suspension et d'oscillation.

A cet effet, on dispose, à une petite distance du centre de la lentille, un petit couteau, qu'on peut faire monter ou descendre à l'aide d'une vis. On fait osciller le pendule sur ce nouveau centre de rotation, qu'on déplace au moyen de la vis, jusqu'à ce qu'on soit arrivé à une position telle que le pendule fasse exactement le même nombre d'oscillations qu'avant d'être retourné. La distance des tranchants des couteaux donne alors très-sensiblement la longueur du pendule simple cherché.

Lorsque le centre de rotation est sur un ressort ou un fil de suspension, ce procédé n'offre plus une exactitude suffisante, mais on peut le remplacer par un autre, d'une application facile. On prend un pendule formé d'une petite boule de platine, suspendue à un fil de soie, très-fin et très-léger, et l'on pince ce fil, de manière à ce que la longueur jusqu'au centre de la boule soit égale à celle que donne la table (page 85), pour le nombre d'oscillations qu'on veut produire avec le pendule composé. En faisant alors osciller ces deux pendules, on arrive, par tâtonnements, à disposer le pendule composé, de manière à ce qu'il oscille exactement comme l'autre. Son centre d'oscillation peut alors être déterminé, avec une assez grande approximation, par la longueur libre du petit pendule.

Détermination de la durée d'une oscillation. — La méthode la plus exacte, et qui se présente immédiatement à l'esprit, consiste à mesurer la durée θ d'un certain nombre d'oscillations n du pendule ; en désignant par ε l'erreur commise dans l'évaluation de θ, l'erreur commise sur la durée $\frac{\theta}{n}$ d'une oscillation ne dépasse pas $\frac{\varepsilon}{n}$. Elle peut donc être réduite, autant qu'on le désire, en augmentant la durée de l'observation.

Pour employer cette méthode, on installe, devant le pendule, une lunette dont l'axe soit perpendiculaire au plan d'oscillation. On met le pendule en mouvement et l'on note, sur un chronomètre, l'heure du premier passage; on compte un certain nombre n de passages et l'on prend l'heure du dernier; par différence on a la durée θ.

DES CAUSES D'ALTÉRATION DU MOUVEMENT DES PENDULES COMPOSÉS.

Si les pendules oscillaient dans le vide et si leur mode de suspension ne donnait lieu à aucun frottement, leur mouvement serait indéfini et se retrouverait, au bout de chaque période, dans des conditions toujours identiques.

Mais ces hypothèses, que nous avons pu admettre pour le pendule simple, sont naturellement loin d'être réalisées dans la pratique, où l'on se trouve en présence d'une foule de résistances passives, dont il faut combattre les effets.

Sans parler des variations d'intensité de la pesanteur avec la latitude, qui influent sur la durée des oscillations, on a, pour une même localité, à tenir compte des variations de longueur du pendule, dues aux changements incessants de la température. Les variations de densité de l'air, accusées par le baromètre, donnent lieu également à des résistances variables, qui se traduisent par des dépenses inégales de force motrice. A toutes ces causes d'altération du mouvement du pendule, il convient d'ajouter celles qui proviennent du mode de suspension, du mode de liaison du pendule avec les pièces de l'échappement, etc.

Quelques-unes de ces actions peuvent être à peu près complétement annulées par des dispositifs appropriés : c'est ainsi, par exemple qu'on arrive à supprimer l'influence des changements de température, en employant des tiges compensées. Pour les autres, qui ne peuvent pas être annulées, il ne reste d'autre ressource que de diminuer, le plus possible, leurs effets, en adoptant, pour les pièces, les formes les plus convenables. Mais la détermination de ces formes rationnelles doit nécessairement reposer sur certaines données d'expériences, qui, jusqu'à ces derniers temps, faisaient à peu près entièrement défaut.

On ne peut guère citer, dans le siècle dernier, que les travaux de Berthoud, qui ont été publiés dans son *Essai sur l'Horlogerie.* Encore ces travaux incomplets et déparés par quelques erreurs regrettables n'ont-ils eu qu'une utilité très-restreinte. C'est pour remplir cette lacune que M. J. Wagner a cru devoir entreprendre une série d'expériences très-intéressantes, dont il a consigné les résultats dans un mémoire (*), présenté à l'Exposition universelle de 1867. Par une étude attentive et raisonnée des différentes actions auxquelles se trouvent soumis les pendules, il est arrivé à déterminer :

1° L'influence de la résistance de l'air sur les pièces mises en mouvement, et les lois suivant lesquelles elle varie avec la surface des pièces et le chemin parcouru, ou l'amplitude ;

2° La force motrice nécessaire pour conserver aux oscillations la même amplitude ;

3° Le rapport à adopter entre l'impulsion et l'amplitude de l'oscillation ;

4° Enfin les rapports qu'il convient d'établir entre les longueurs, les poids et les formes des pendules, pour obtenir la marche la plus satisfaisante des pièces d'horlogerie.

(*) Mémoire sur le pendule et le balancier, considérés comme régulateurs des instruments à mesurer le temps, par M. J. Wagner neveu.

Nous allons essayer de résumer, aussi succinctement que possible, les expériences de M. Wagner et les conclusions qu'il en a tirées.

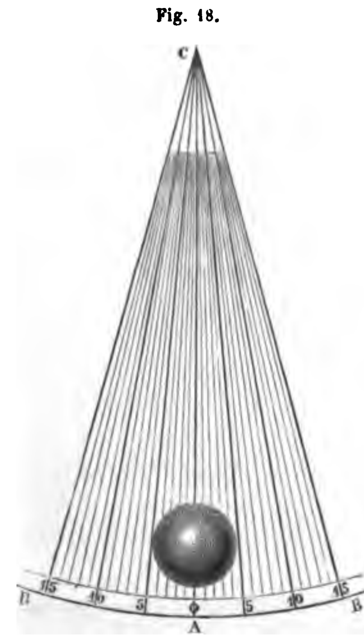
Des résistances de l'air. — « Les résistances que l'air oppose aux oscillations d'un pendule sont de deux sortes, le mouvement communiqué à l'air déplacé et le frottement du pendule contre l'air, qui le presse en tous sens. Par suite de l'élasticité de l'air, ces deux genres de résistances se confondent et il est impossible de faire la part de chacune d'elles, car les molécules, repoussées par le pendule, glissent à droite et à gauche, sans prendre toutes la vitesse de ce pendule; de là une résistance mixte. » C'est cette résistance que M. Wagner s'est proposé de mesurer.

Dans ses expériences, il a commencé par éliminer tout mécanisme, afin de n'avoir affaire au pendule et, par conséquent, de n'avoir à tenir compte que des frottements de la suspension et des résistances que l'air oppose au mouvement, lorsqu'on fait varier le poids du pendule, sa longueur, sa surface et l'amplitude des oscillations.

Le support, destiné à recevoir les divers pendules à expérimenter, était solidement fixé contre un gros mur, à l'abri de toute vibration. Chaque pendule était en parfaite liberté et oscillait, parallèlement à ce mur, dans un cabinet bien clos, où l'air ne pouvait recevoir aucune agitation du dehors.

Derrière le pendule, et très-près, était établi un tableau plan, sur lequel se trouvait tracée une verticale CA (*fig.* 18) passant par le centre de suspension. De ce centre, avec un rayon CA, un peu plus grand que le pendule à secondes, le plus long qui ait été expérimenté, était tracé un cercle, divisé en degrés et fractions de degrés, de chaque côté de la verticale. Les différents points de division étaient réunis au centre C par des rayons, de manière à ce que le même tableau pût servir pour toutes les longueurs de pendules.

Fig. 18.



Le support était disposé pour recevoir indistinctement une suspension à couteau ou une suspension à ressort, afin de permettre d'expérimenter l'une et l'autre. M. Wagner a, d'ailleurs, pu conclure de ses expériences que les résultats obtenus, avec ces deux modes de suspension, ne diffèrent pas sensiblement, lorsque les couteaux sont en très-bon état et que les lames de suspension sont très-flexibles.

Première série d'expériences. — La première série d'expériences a porté sur quatre pendules, munis d'une suspension à couteau et dont les longueurs étaient réglées pour battre la seconde. Afin d'opérer dans les conditions les plus rapprochées du pendule théorique, les tiges de ces divers pendules étaient en acier rond tiré, d'un millimètre de diamètre seulement; les lentilles étaient circulaires, à faces planes, verticales et parallèles au plan d'oscillation; elles avaient toutes le même poids, 1200 grammes, mais leurs surfaces extérieures étaient différentes et représentées respectivement par $0^{mq},028625$, $0^{mq},057250$, $0^{mq},114500$ et $0^{m},229000$, c'est-à-dire qu'elles étaient, entre elles, dans le rapport des nombres 1, 2, 4 et 8; les pendules correspondants portaient les nos 1, 2, 3 et 4.

On donnait à tous ces pendules une même impulsion initiale, en les élevant du même nombre de degrés, au delà de la verticale. Dans toutes les expériences, l'écart initial était légèrement supérieur à 6°, mais on ne commençait à compter le temps qu'à partir du moment où l'amplitude de l'oscillation correspondait rigoureusement à 6°, de chaque côté de la verticale. Cette amplitude diminuait progressivement et arrivait à n'être plus que de 5°, 4°, 3°... jusqu'à l'arrêt complet du pendule; on notait les heures qui correspondaient à ces différentes valeurs.

En opérant ainsi, M. Wagner a obtenu des résultats qui lui ont permis de déterminer de quelle manière varient les résistances de l'air, avec les surfaces de pendules et les espaces parcourus; il en a déduit la force motrice qu'il est nécessaire d'appliquer à un pendule donné, pour vaincre ces résistances et entretenir une amplitude constante des oscillations.

Chacune des expériences a été répétée un grand nombre de fois, afin d'éliminer l'influence des petites perturbations, dues aux changements de température, aux variations de la pression atmosphérique, de telle sorte que les chiffres consignés, pour chaque pendule, dans le tableau suivant, doivent être considérés comme des moyennes.

DIMINUTION de l'amplitude des demi-oscillations.	NOMBRE DE MINUTES pour chaque degré perdu.				OBSERVATIONS.
	Pendule nº 1.	Pendule nº 2.	Pendule nº 3.	Pendule nº 4.	
	m.	m. s	m. s.	m. s.	
De 6 degrés à 5 degrés.	12	9,30	7,00	4,30	Pour chaque pendule on a noté la dernière heure, non pas au moment où ce pendule était complétement arrêté, mais lorsque l'amplitude n'était plus que de 1/30 de degré environ. A partir de ce moment, la marche était hésitante et incertaine.
— 5 — 4 —	16	13,00	8,30	6,15	
— 4 — 3 —	25	18,00	13,00	8,15	
— 3 — 2 —	36	26,00	18,00	12,00	
— 2 — 1 —	70	60,00	35,00	25,00	
— 1 — 0 —	280	240,00	180,00	100,00	
	539	366,30	261,30	156,00	

Les chiffres de ce tableau font nettement ressortir l'influence qu'exer-

cent, sur la marche d'un pendule, l'amplitude des oscillations et la surface de la lentille. Le pendule n° 1, par exemple, a perdu 1° d'amplitude en 12 minutes, quand cette amplitude était, en moyenne, de 5° 1/2, tandis qu'il a fallu 36 minutes, pour perdre 1°, lorsque l'amplitude n'était plus que de 2° 1/2. Les autres pendules donnent des résultats analogues. La loi de variation, qu'on pourrait en déduire, se rapprocherait beaucoup de celle que Borda a trouvée dans le cas des mouvements lents et qui consiste en ce que les amplitudes décroissent en progression géométrique, lorsque les temps croissent en progression arithmétique. Dans ce cas, la résistance de l'air doit être simplement proportionnelle à la vitesse.

Nous pouvons donc admettre que, quand l'amplitude reste comprise dans les limites des expériences de M. Wagner, la résistance opposée par l'air au mouvement du pendule est directement proportionnelle à la vitesse ou à l'espace parcouru par ce pendule (*).

Le tableau précédent montre également que les divers pendules considérés perdent les mêmes quantités d'amplitude dans des temps qui sont inversement proportionnels aux racines carrées de leurs surfaces. Ainsi, par exemple, pour les pendules 1 et 3, dont les surfaces sont dans le rapport de 1 à 4, l'inverse du rapport des racines carrées de ces surfaces est $\frac{2}{1}$ et, à part quelques différences assez faibles, les nombres de la première colonne sont respectivement doubles de ceux de la troisième.

Comme les résistances sont elles-mêmes en raison inverse des temps, on peut conclure de là que, pour des pendules de même longueur, de même poids et de surfaces de même forme, les résistances sont directement proportionnelles aux racines carrées de ces surfaces.

En expérimentant comparativement les pendules n° 1 et n° 4, dont les lentilles ont des surfaces dans le rapport de 1 à 8, et en réglant leurs longueurs pour les amener à battre tous deux la seconde, M. Wagner a trouvé que le pendule n° 4 était de 25 millimètres plus court que l'autre. L'accélération qu'il aurait dû prendre sur le premier, par suite de cette moindre longueur, se trouvait donc exactement compensée par le retard dû à la plus grande résistance de l'air.

En ne tenant compte que des variations de force nécessitées par la résistance de l'air, on peut conclure de ce qui précède que, pour maintenir un pendule à une amplitude déterminée, il faut donner au poids moteur une valeur qui soit en raison directe de cette amplitude, c'est-à-dire que, pour une amplitude de 6°, par exemple, la force motrice doit être théoriquement le triple de ce qu'elle doit être pour une amplitude de 2°.

Un grand nombre d'anciennes horloges monumentales et même de

(*) Pour des amplitudes plus considérables, la résistance doit suivre une loi plus compliquée, qui doit renfermer le carré de la vitesse ou une puissance supérieure.

pièces d'intérieur sont munies de pendules dont les oscillations ont des amplitudes énormes, atteignant parfois 20° et même 25°, de chaque côté. D'après ce que nous venons de dire, pour maintenir des amplitudes aussi exagérées, il faut des forces motrices considérables, ce qui est toujours une faute grave en horlogerie.

Deuxième série d'expériences. — Dans une seconde série d'expériences, M. Wagner s'est proposé d'étudier l'influence de la forme des lentilles sur la résistance de l'air. A cet effet, il a établi trois pendules battant la seconde, avec des lentilles, dont les poids étaient les mêmes (1200 grammes), mais dont les formes étaient très-différentes.

La première était une sphère, de 60 millimètres de diamètre.

La deuxième était une lentille, de forme ordinaire, composée d'un disque circulaire de 136 millimètres de diamètre, de 18 millimètres d'épaisseur au centre et se réduisant à rien sur le bord.

Enfin la troisième était un cylindre, de 120 millimètres de hauteur et 36 millimètres de diamètre, se terminant à chaque bout par une demi-sphère.

Les surfaces de ces trois lentilles étaient respectivement de $0^{mq},0110$, $0^{mq},0286$ et $0^{mq},0136$.

Ces trois pendules, expérimentés de la même manière que les précédents, dans les mêmes conditions d'amplitude, ont donné les résultats consignés dans le tableau ci-dessous :

DIMINUTION de l'amplitude des demi-oscillations.	NOMBRE DE MINUTES pour chaque degré perdu par le pendule		
	sphérique.	lenticulaire.	cylindrique.
	minutes.	minutes.	minutes.
De 6 degrés à 5 degrés.	12	11	10
— 5 — 4 —	17	16	13
— 4 — 3 —	26	25	20
— 3 — 2 —	40	36	30
— 2 — 1 —	80	70	60
— 1 — 0	390	380	300

On voit, d'après cela, que c'est le pendule sphérique qui éprouve la moindre résistance de la part de l'air et le pendule cylindrique qui en éprouve le plus.

En ce qui regarde le pendule sphérique, ce résultat est conforme à ce que nous avons trouvé précédemment, puisque ce pendule est celui dont la surface est la plus faible. Mais il semble que, pour le même motif, le pendule cylindrique, dont la surface n'est que de $0^{mq},0136$, devrait éprouver moins de résistance que le pendule lenticulaire, dont la surface est de $0^{mq},0286$; c'est précisément le contraire qui a lieu. Cette anomalie ne

peut s'expliquer qu'en se reportant à ce que nous avons dit (page 93) sur les deux genres de résistances, opposées par l'air aux oscillations d'un pendule. Avec le cylindre, l'action de déplacement de l'air est relativement beaucoup plus prononcée que celle du glissement, de telle sorte que la résistance mixte, par unité de surface, a une valeur plus forte qu'avec la forme lenticulaire, qui donne lieu surtout à des frottements de glissement.

En définitive, au point de vue de la résistance de l'air, la forme par excellence est celle de la sphère. Immédiatement après vient la forme lenticulaire, proprement dite, dont la supériorité, sur les formes cylindriques et autres, tient principalement à ce qu'elle fend l'air, au lieu de le repousser.

A côté de cet avantage, il convient de signaler un inconvénient de la forme lenticulaire; si le plan de la lentille ne se trouve pas rigoureusement perpendiculaire à l'axe de suspension, elle peut prendre, par suite de la résistance de l'air, un mouvement ondulatoire, plus ou moins prononcé, suivant la densité de l'air, le mode de suspension, etc., et ce mouvement peut être de nature à affecter le réglage des pièces de précision.

Influence des variations barométriques. — M. Wagner a étudié également les influences que les variations barométriques exercent sur le mouvement des pendules. En opérant sous des pressions de $0^m,73$ et $0^m,78$, avec deux des quatre pendules de la première série d'expériences, il a pu observer les temps correspondant aux diminutions d'amplitude, pour chacune de ces pressions, et il a constaté ainsi que les différences de résistance de l'air sont sensiblement proportionnelles aux différences de pression, résultat, d'ailleurs, facile à prévoir.

DU POIDS DES PENDULES.

Il existe, parmi les horlogers, des opinions assez contradictoires sur la question du poids qu'il convient de donner à un pendule, au point de vue de la bonne marche de la pièce à laquelle ce pendule doit servir de régulateur. Suivant les uns, un pendule léger est préférable, parce qu'il fatigue moins la suspension, qu'il exige moins de force motrice, etc. Suivant les autres, il vaut mieux employer un pendule lourd, parce que son action régulatrice est plus sûre et que sa marche n'est pas exposée à être contrariée, comme celle d'un pendule léger, par la moindre trépidation du sol ou par l'agitation de l'air. Nous devons ajouter que la plupart des horlogers, qui partagent cette dernière opinion, admettent, comme les premiers, que la force motrice absorbée par un pendule lourd est plus grande que celle exigée par un pendule léger. C'est là une erreur, et il est facile de démontrer que, pour un même angle d'oscillation, la force

motrice, nécessaire à l'entretien du mouvement, reste la même, ou à très-peu près, quel que soit le poids de la lentille.

Pour expliquer théoriquement ce résultat, il suffit de remarquer que deux pendules, de même longueur et de même mouvement angulaire, mais de poids différents, peuvent être assimilés à deux corps pesants, tombant *de la même hauteur*. Si la chute avait lieu dans le vide, ces deux corps tomberaient avec la même vitesse. Comme, en réalité, les deux pendules se meuvent dans l'air, il est nécessaire, pour entretenir le mouvement, de restituer à chacun d'eux la perte qui résulte de la résistance de l'air et de la suspension. Dans la pratique, cette perte diffère très-peu d'un pendule à l'autre, car si le pendule léger subit un peu plus la résistance de l'air, il fait éprouver, par contre, une moindre fatigue à la suspension.

M. Wagner a traité cette question expérimentalement. A cet effet, il a disposé 4 pendules de même longueur et battant la seconde, dont les lentilles, de même diamètre et de même surface extérieure, ne différaient que par leurs poids, qui étaient dans le rapport des nombres 1, 2, 4, 8. Le poids le plus faible était de 1200 grammes.

Pour éviter de trop grandes différences dans les épaisseurs des lentilles, elles étaient faites de métaux de densités différentes; on avait eu soin de tenir compte des différences d'épaisseur, relativement aux résistances de l'air. La tige de chaque pendule étant formée d'un fil d'acier tiré, de 1 millimètre de diamètre, on pouvait admettre que toute la masse du pendule se trouvait répartie uniformément autour du centre de gravité de la lentille.

Ces pendules, entièrement libres, ont été suspendus successivement sur le même support et avec les mêmes lames, faites en acier très-flexible; ils étaient, par suite, dans des conditions identiques, et les différences dans les résultats, s'il s'en présentait, ne pouvaient être attribuées qu'aux différences de poids des lentilles.

Les expériences sur ces pendules, dirigées exactement de la même manière que les précédentes, ont donné les résultats suivants :

DIMINUTION DE L'AMPLITUDE des demi-oscillations.	NOMBRE DE MINUTES POUR CHAQUE DEGRÉ PERDU.			
	Pendule n° 1 1200 gr.	Pendule n° 2 2400 gr.	Pendule n° 3 4800 gr.	Pendule n° 4 9600 gr.
	m. s.	m. s.	min.	min.
De 6 degrés à 5 degrés.	4,00	8,00	16	31
— 5 — à 4 —	5,15	9,45	19	36
— 4 — à 3 —	7,00	13,45	27	52
— 3 — à 2 —	9.30	18,30	36	71
— 2 — à 1 —	17,15	34,00	67	134
— 1 — à 0 —	90,00	176,0	325	600

D'après les chiffres de ce tableau, les temps, pendant lesquels les pen-

dules ont perdu un degré d'amplitude, peuvent être considérés comme proportionnels aux poids de ces pendules, ou encore aux valeurs de leurs impulsions, puisque, tous ces pendules descendant de la même hauteur et parcourant des arcs égaux, la grandeur de l'impulsion, pour chacun d'eux, est elle-même proportionnelle à son poids. Ainsi, par exemple, pour le pendule n° 3, dont le poids est quatre fois celui du pendule n° 1, l'impulsion est quatre fois plus grande que celle de ce dernier pendule, et la perte de 1 degré exige quatre fois plus de temps.

Les petites différences, qui existent entre les chiffres du tableau et ceux qui résulteraient d'une proportionnalité rigoureuse, doivent être attribuées aux légères variations qu'éprouve la résistance des ressorts de suspension. Il est bien évident, en effet, que les lames ont une tension d'autant plus grande que le pendule est plus pesant; cette tension se traduit par une certaine roideur de ces lames, qui rend leur flexion d'autant plus difficile qu'elle est elle-même plus prononcée. Il en résulte que la suspension oppose aux oscillations du pendule une résistance, qui augmente avec le poids de ce pendule.

En laissant de côté ces légères différences, on peut énoncer, en principe, que la force dépensée, pour chaque oscillation, est complétement indépendante du poids du pendule. Par conséquent, la force motrice, que transmet l'échappement, ne doit éprouver aucun changement, quelles que soient les modifications qu'on fasse subir au poids du pendule.

Comme ce principe a une grande importance, M. Wagner a tenu à le vérifier par une série d'expériences exécutées dans des conditions différentes des précédentes. Dans ce but, il a remplacé les lentilles par un vase cylindrique en verre, dans lequel il versait plus ou moins de mercure, pour obtenir des pendules de poids variables. Les résultats obtenus avec ces pendules ont présenté une concordance complète avec ceux du tableau précédent.

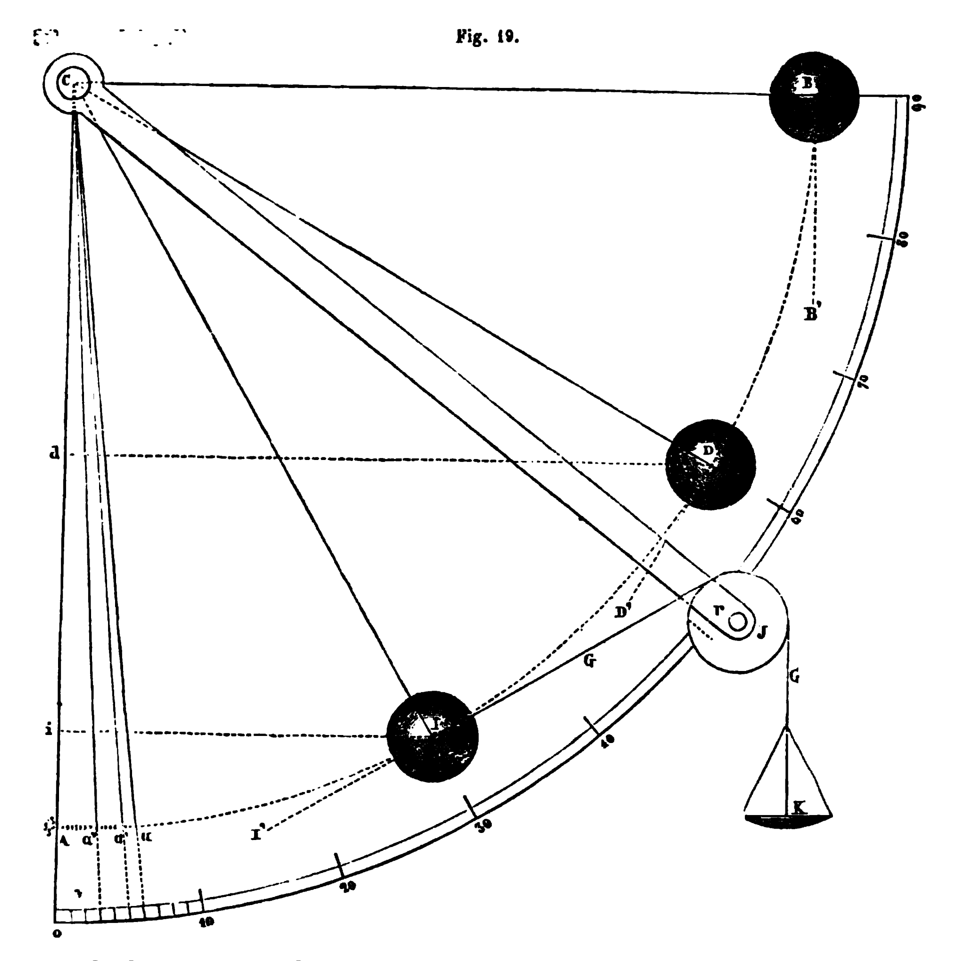
La force motrice étant indépendante du poids du pendule, comme il est, d'ailleurs, incontestable que la marche d'une horloge est d'autant plus régulière que le pendule est plus lourd, il est évident qu'on doit employer des pendules lourds, de préférence à des pendules légers, sans cependant les faire d'un poids exagéré, relativement aux ressorts, couteaux ou pivots, qui doivent les supporter.

Évaluation de la force motrice nécessaire à la marche d'une pièce d'horlogerie, dont le régulateur est un pendule. — Comme moyen facile et pratique de mesurer l'impulsion d'un pendule quelconque, en fonction de son poids et de l'amplitude de son oscillation, M. Wagner a proposé l'emploi d'une échelle proportionnelle des impulsions.

Pour simplifier le tracé de cette échelle, on peut supposer la tige du pendule sans pesanteur et toute la masse concentrée au centre de la len-

tille. Dans cette hypothèse, la *fig.* 19 représente, au dixième, un pen-

Fig. 19.



dule de 1 mètre de longueur, c'est-à-dire que la distance CA du centre de suspension au centre de la lentille est, sur cette figure, de 1 décimètre ou 100 millimètres.

La ligne CA étant verticale et la ligne CB horizontale, si nous supposons qu'on laisse tomber le pendule du point B, la pesanteur, au départ, s'exerce suivant la verticale BB', la tension de la tige CB est nulle et la pesanteur agit avec toute son intensité : par conséquent, au point B, la grandeur de l'impulsion est le poids même du pendule, que nous désignerons par P.

Quand le pendule est en D, la tige CD possède une certaine tension et la force d'impulsion, qui agit suivant la tangente au cercle en D, est la résultante de cette tension et du poids P. Pour la déterminer, il suffit de construire le parallélogramme des forces PDD"D', dans lequel DP représente le poids P; la longueur DD' est alors la grandeur relative de

l'impulsion. Dans le triangle DD'P (*fig.* 20) l'angle en P est égal à l'angle ACD; en désignant cet angle par C, DD' par F et DP par P, on a, en vertu des propriétés du triangle rectangle :

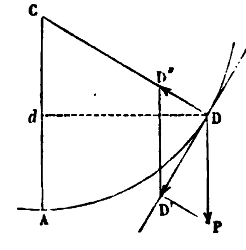


Fig. 20.

$$F = P \cdot \sin C.$$

La valeur de sin C est fournie par les tables des lignes trigonométriques; il suffit donc, pour une demi-amplitude quelconque C, de prendre, dans ces tables, la valeur du sinus et de la multiplier par le poids P du pendule, pour obtenir l'impulsion correspondant à cette demi-amplitude.

Il est possible, d'ailleurs, d'éviter la considération de cette ligne trigonométrique, et de remplacer son emploi par une simple construction géométrique. Si, en effet, on mène, par le point D, l'horizontale D*d*, les deux triangles, DD'P et CD*d* sont semblables, puisque leurs angles sont égaux, et, par suite, leurs côtés sont proportionnels; on a donc :

$$\frac{F}{P} = \frac{Dd}{CD}.$$

Il suffit donc de mesurer D*d* et de prendre son rapport à CD. Du reste, ce rapport $\frac{Dd}{CD}$ est précisément ce qui, par définition, constitue le sinus de l'angle C. Si l'on suppose que le rayon CD soit pris comme unité, la valeur du sinus est alors donnée par le nombre fractionnaire qui correspond à la perpendiculaire D*d*.

Pour l'angle ACD = 60°, la perpendiculaire D*d* est de 87 millimètres, et comme CA = 100 millimètres, il en résulte que le sinus est égal à 0,87.

On a donc, dans ce cas :

$$F_1 = 0{,}87\ P.$$

De même, pour le point I, correspondant à l'angle ACI = 30°, on trouve I*i* = 50 millimètres et, par suite :

$$F_2 = 0{,}50\ P.$$

On peut ainsi déterminer facilement la grandeur de l'impulsion, pour une valeur quelconque de la demi-amplitude, et former le tableau suivant :

VALEUR DE LA DEMI-AMPLITUDE.	8°	7°	6°	5°	4°	3°	2°	1°	1/2°
Rapport $\frac{F}{P}$ = ...	0,139	0,122	0,1045	0,087	0,070	0,052	0,035	0,017	0,009

Pour un pendule de 1200 grammes, la valeur de l'impulsion, correspondant à un écart de 6°, serait égale à $1200 \times 0,1045 = 125$ grammes.

Ces résultats théoriques peuvent être vérifiés expérimentalement, au moyen du dispositif représenté *fig.* 19 et qui se compose essentiellement d'un bras de levier C*r*, dont le centre de mouvement se confond avec le centre de suspension C du pendule. En *r*, ce bras porte une poulie J, douée d'une grande mobilité sur son axe et munie d'une gorge, sur laquelle s'enroule la corde G d'un plateau K, qui peut recevoir des poids.

Pour déterminer expérimentalement la valeur de l'impulsion du pendule, placé en I, par exemple, on attache la corde G, de manière qu'elle corresponde au centre de ce pendule et qu'elle soit tangente, en I, à l'arc de cercle AIB ; il suffit, pour cela, de placer convenablement le bras C*r*. On charge alors le plateau K, pour établir l'équilibre dans cette position. Le poids nécessaire, augmenté de celui du plateau, représente la valeur de l'impulsion et l'on trouve que cette valeur est la même que celle donnée par le calcul précédent.

La formule $F = P \sin C$ montre que l'impulsion est indépendante de la longueur du pendule. On peut donc, au moyen du tableau précédent ou de l'échelle des impulsions, déterminer l'impulsion pour un pendule quelconque.

Pour un pendule de 25 centimètres de longueur, pesant 60 grammes et pour un écart de 6°, on aurait :

$$F = 60 \times 0,1045 = 6^{gr},3.$$

Applications. — Cette même échelle des impulsions va nous servir à évaluer, en poids, la dépense de force motrice faite par chacun des quatre pendules du tableau de la page 98.

Prenons d'abord le pendule n° 1, dont le poids est de 1200 grammes. Lorsque l'amplitude de sa demi-oscillation est de 6°, la valeur de l'impulsion est représentée par $1200 \times 0,1045 = 125$ grammes ; de même, pour 5°, elle est égale à $1200 \times 0,087 = 104$ grammes.

Le pendule, en perdant son 6° degré d'amplitude, a donc perdu, sur l'intensité de son impulsion, $125 - 104 = 21$ grammes.

Il a fait cette perte en 4 minutes ou en 240 oscillations, puisqu'il bat la seconde. La perte moyenne, par oscillation, a donc été de $\frac{21}{240} = 87$ milligrammes.

Pour le pendule n° 2, dont le poids est de 2400 grammes, ou le double du précédent, les impulsions, pour 6° et 5°, sont respectivement doubles des précédentes, c'est-à-dire 250 grammes et 208 grammes. La perte d'impulsion, de 6° à 5°, a donc été de 42 grammes. Comme cette perte

s'est produite en 8 minutes ou 480 oscillations, la perte moyenne, par oscillation, a été de $\frac{42}{480} = 87$ milligrammes, c'est-à-dire la même que pour le pendule n° 1.

On trouverait naturellement les mêmes résultats pour les deux autres pendules, à la condition d'admettre que la perte du 6° degré, pour le pendule n° 4, a eu lieu en 32 minutes, au lieu de 31 minutes, qu'indique l'expérience. Nous avons, du reste, indiqué la cause à laquelle devait être attribuée cette différence de 1 minute.

Il est donc bien établi que, pour des pendules de même longueur et de même amplitude d'oscillation, la perte de mouvement (et, par suite, la dépense de force motrice) est toujours la même, quels que soient les poids de ces pendules.

Influence du poids du pendule sur la régularité de la marche. — Nous avons admis précédemment (p. 99) que la régularité de la marche d'une horloge était d'autant mieux assurée que le pendule était plus lourd. C'est ce qu'il est facile de démontrer, en s'appuyant sur les principes que nous venons d'établir.

Supposons que, pour une horloge donnée, les résistances de l'air et de la suspension, ainsi que les frottements de la fourchette, de l'échappement et de ses axes, soient équivalents à 25 grammes. Si le poids du pendule est de 1200 grammes et l'amplitude de la demi-oscillation de 6°, l'impulsion sera, d'après ce que nous avons vu, de 125 grammes. Par conséquent, le rapport de la force régulatrice à la somme des forces perturbatrices sera représenté par $\frac{125}{25}$ ou $\frac{5}{1}$. Si, au contraire, nous appliquons à la même horloge un pendule pesant 9600 grammes, c'est-à-dire huit fois plus lourd que le précédent, sa force d'impulsion, pour l'angle de 6°, sera de 1000 grammes, c'est-à-dire 40 fois la somme des forces perturbatrices. Il est bien évident que, dans ce cas, la régularité de la marche sera beaucoup mieux assurée.

Il y a donc tout avantage à employer des pendules lourds, puisque, d'un autre côté, nous avons démontré que ces pendules n'exigeaient pas plus de force motrice que les pendules légers. On ne doit se limiter, pour le poids à donner aux pendules, que par la considération des ressorts, couteaux ou pivots qui doivent les supporter.

Dans les horloges monumentales, l'expérience prouve qu'avec une suspension à ressort, même très-flexible, on peut, sans inconvénient, faire des pendules du poids de 200 à 300 kilogrammes.

DE LA LONGUEUR DES PENDULES.

Nous venons de voir que la force d'impulsion est indépendante de la longueur du pendule et, à ce point de vue, il est absolument indifférent d'employer des pendules longs ou courts. Mais, en dehors de l'impulsion, il importe de tenir compte des résistances de l'air et de la suspension, lesquelles sont variables avec la longueur du pendule.

Si nous considérons deux pendules dont les oscillations aient la même amplitude, les espaces parcourus par les lentilles sont proportionnels aux longueurs de ces pendules, et les résistances opposées par l'air au mouvement de ces lentilles, pour chaque oscillation, sont dans le même rapport. Comme la durée des oscillations, pour chaque pendule, est proportionnelle à la racine carrée de sa longueur, il en résulte que les résistances de l'air, pour des temps égaux, sont, en réalité, proportionnelles aux racines carrées des longueurs des pendules. Si l'on désigne, en effet, par R et R′ les résistances correspondant aux durées T et T′ des oscillations des pendules, de longueurs L et L′, on a, d'après ce qui précède, la proportion :

$$\frac{R}{R'} = \frac{L}{L'},$$

et, d'un autre côté, d'après la formule (2), page 82 :

$$\frac{T}{T'} = \frac{\pi\sqrt{\frac{L}{g}}}{\pi\sqrt{\frac{L'}{g}}} = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{L'}}.$$

Divisant ces deux rapports membre à membre, on obtient

$$\frac{\frac{R}{T}}{\frac{R'}{T'}} = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{L'}}.$$

Or $\frac{R}{T}$ et $\frac{R'}{T'}$ représentent précisément les résistances de l'air, pour des temps égaux, et l'on voit qu'elles sont proportionnelles aux racines carrées des longueurs.

Au point de vue de la perte de force, correspondant à la résistance de l'air, il faudrait donc faire les pendules aussi courts que possible. Mais il est une autre résistance à vaincre, celle de la suspension, qui varie, au contraire, en raison inverse de la racine carrée de la longueur. Chaque

oscillation d'un pendule exigeant, en effet, la flexion des lames de la suspension, la somme des résistances partielles, pendant un temps donné, doit être en raison du nombre d'oscillations dans le même temps.

Ainsi, pour deux pendules d'inégales longueurs, les résistances dues à la suspension sont directement proportionnelles aux nombres d'oscillations pendant le même temps. Comme ces nombres sont eux-mêmes en raison inverse des racines carrées des longueurs, il en résulte que les résistances des suspensions sont inversement proportionnelles à ces racines carrées.

Des deux résistances que nous venons de considérer, l'une augmente donc avec la longueur des pendules et l'autre diminue; on peut admettre qu'entre certaines limites de variation de la longueur, il s'établit une espèce de compensation et que, par suite, entre ces limites que nous indiquerons, la somme des pertes de force reste sensiblement constante.

La pratique démontre, d'ailleurs, que les perturbations apportées dans la marche d'un pendule par la suspension ont relativement plus d'importance que celles dues à la résistance de l'air; par conséquent, il peut y avoir quelque avantage à allonger les pendules.

Pour résoudre cette question expérimentalement, M. Wagner a pris 4 pendules, dont les longueurs étaient de 0m,25, 0m,50, 1 et 4 mètres, et qui avaient la même lentille, une sphère en plomb de 1200 grammes. Les tiges, en acier rond tiré, de 1 millimètre de diamètre, comme dans toutes les expériences précédentes, étaient reliées à une suspension à couteau en parfait état.

Les expériences faites avec ces 4 pendules libres ont donné les résultats suivants :

DIMINUTION DE L'AMPLITUDE des demi-oscillations.	NOMBRE DE MINUTES CORRESPONDANT A LA PERTE DE 1°.			
	Pendule de 0m,25.	Pendule de 0m,50.	Pendule de 1 mèt.	Pendule de 4 mèt.
	minutes.	minutes.	minutes.	minutes.
De 6 degrés à 5 degrés.	12	13	12	6
— 5 — à 4 —	17	18	17	8
— 4 — à 3 —	26	27	26	12
— 3 — à 2 —	40	48	40	20
— 2 — à 1 —	76	100	80	40
— 1 — à 0 —	280	290	300	200

A part des différences assez faibles pour être négligées, les trois premiers pendules ont fait, dans le même temps, des dépenses de force sensiblement égales. Ce résultat tient à ce qu'il s'est établi une compensation, presque parfaite, entre les augmentations de la résistance de l'air et les diminutions de résistance de la suspension, à mesure qu'on opérait sur des pendules plus longs. Dans ces limites, on peut donc, pour les usages

ordinaires, employer indistinctement des pendules de 25, 50 et 100 centimètres, sans faire varier sensiblement la force dépensée.

Pour le pendule de 4 mètres de longueur, il n'en est plus de même. Le tableau montre que sa dépense de force est à peu près double de celle des trois autres, *dans le même temps.*

Si l'on compare les pendules de $0^m,25$ et de 4 mètres, on voit d'abord que leurs longueurs étant dans le rapport de 1 à 16, les résistances opposées par l'air, dans le même temps, sont dans le rapport des racines carrées de ces longueurs, c'est-à-dire de 1 à 4. Si donc la perte de force due à la suspension était restée la même, le long pendule aurait dû perdre chaque degré d'amplitude en quatre fois moins de temps que le petit; ce temps n'étant, en réalité, que le double, d'après le tableau, on doit forcément admettre que la résistance de la suspension n'a pas varié dans le même rapport que celle de l'air, et qu'elle a eu pour effet de compenser cette dernière dans une certaine mesure.

Les conclusions précédentes ne sont applicables qu'aux pendules qu'on peut considérer comme simples, c'est-à-dire ceux dans lesquels le centre d'oscillation se confond sensiblement avec le centre de figure de la lentille. Pour les pendules composés, tels qu'on les emploie ordinairement dans la pratique, ces conclusions se trouvent modifiées par certaines causes perturbatrices que nous allons examiner.

La tige d'un pendule étant généralement une lame d'un poids plus ou moins considérable, le centre d'oscillation se trouve plus ou moins au-dessus du centre de la lentille; ce centre d'oscillation tend, par suite, à aller plus vite que l'autre et il se produit, à chaque oscillation, une contraction ou une déformation de la tige du pendule.

Si l'on fait osciller un pendule de $0^m,25$ de longueur, muni d'une lentille de $0^m,30$ à $0^m,40$ de diamètre, on peut remarquer qu'à chaque passage de la tige devant la verticale, il y a une réaction qui déforme la tige, le haut de cette lentille tendant déjà à revenir en arrière, quand son centre marche encore en avant. Si la tige est très-flexible, elle fléchira réellement et il se produira un recul de sa partie moyenne, visible à l'œil. Si cette tige est suffisamment rigide, cette réaction se portera sur les lames de suspension; de là des flexions et des résistances, dont le calcul ne peut tenir aucun compte, mais qui sont une des causes pour lesquelles les pendules courts dépensent plus de force motrice que les pendules longs.

Il est évident, d'après cela, qu'entre les pendules très-longs, pour lesquels la résistance de l'air est très-considérable, et les pendules très-courts, dont les lames de suspension absorbent beaucoup de force, il doit nécessairement exister une longueur moyenne, qui correspond au minimum de résistance.

Le calcul ne pouvant servir seul à déterminer cette longueur, il est in-

dispensable de recourir à l'expérience. Les seuls essais de quelque importance, entrepris pour résoudre cette question, sont encore dus à M. Wagner.

Il a opéré sur cinq lentilles de même poids (1200 grammes), mais de formes différentes. La première était sphérique, les quatre autres circulaires, à faces planes, parallèles au plan d'oscillation; leurs surfaces étaient dans le rapport des nombres 1, 2, 4 et 8. Ces cinq lentilles avaient, du reste, été employées dans les expériences que nous avons précédemment citées. Chacune d'elles a été successivement attachée à trois tiges d'acier rond tiré, ayant respectivement pour longueur $0^m,25$, 1 mètre et 4 mètres. La suspension était à ressort et elle est restée la même pour toutes les expériences, qui ont été répétées un grand nombre de fois.

Le tableau suivant renferme les résultats moyens de toutes ces expériences.

DIMINUTION de l'amplitude d'une demi-oscillation.	NOMBRE DE MINUTES CORRESPONDANT A LA PERTE DE 1°.														
	Lentille sphérique n° 1. Longueur de la tige.			Lentille n° 2. Longueur de la tige.			Lentille n° 3. Longueur de la tige.			Lentille n° 4. Longueur de la tige.			Lentille n° 5. Longueur de la tige.		
	$0^m,25$	1^m	4^m	$0^m,25$	1^m	4^m	$0^m,25$	1^m	4^m	$0^m,25$	1^m	4^m	$0^m,25$	1^m	4^m
	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.	min.
De 6° à 5°	$10\frac{1}{2}$	11	6	$9\frac{1}{2}$	$10\frac{1}{2}$	6	8	$9\frac{1}{2}$	$5\frac{3}{4}$	5	7	$4\frac{1}{2}$	$3\frac{3}{4}$	$4\frac{1}{2}$	4
— 5 — 4	12	15	8	12	13	8	9	13	8	6	$8\frac{1}{2}$	$7\frac{1}{2}$	5	6	5
— 4 — 3	20	24	12	15	18	12	12	18	12	7	12	11	$6\frac{1}{2}$	8	$6\frac{1}{2}$
— 3 — 2	28	38	20	20	28	20	18	25	20	11	17	16	8	10	10
— 2 — 1	40	75	40	30	48	36	28	45	30	22	30	28	13	20	19
— 1 — 0	200	300	240	150	250	240	200	220	200	100	160	150	80	100	100

En consultant ce tableau, on reconnaît qu'avec toutes les lentilles, c'est le pendule de 1 mètre de longueur qui donne les meilleurs résultats. En raison des compensations, qui s'établissent entre la résistance de l'air et celle de la suspension, c'est toujours ce pendule pour lequel la somme de ces résistances est un minimum.

Nous pouvons donc conclure de ces expériences qu'il faut éviter également d'employer des pendules trop longs ou trop courts et que la longueur la plus convenable correspond sensiblement à celle du pendule qui bat la seconde ($0^m,994$). D'une manière plus générale, on peut dire que, pour obtenir des résultats satisfaisants, il convient que la longueur d'un pendule soit supérieure à $0^m,25$ et inférieure à $1^m,50$.

Dans la pratique, on est parfois obligé d'employer des pendules d'une très-faible longueur; mais on ne doit pas perdre de vue, dans ce cas, qu'au-dessous de $0^m,25$ la perte de force motrice est assez considérable.

FORCE MOTRICE NÉCESSAIRE A L'ENTRETIEN DU MOUVEMENT D'UN PENDULE.

Par suite des différentes résistances, auxquelles il est soumis et dont nous venons d'étudier l'influence, un pendule finirait par arriver au repos, si une force motrice quelconque ne venait lui restituer, à chaque oscillation, la quantité de mouvement qu'il tend à perdre pendant cette même oscillation.

Les résultats des expériences précédentes permettent de déterminer facilement cette quantité de mouvement ou, ce qui revient au même, la force motrice nécessaire pour entretenir le mouvement d'une horloge avec une amplitude donnée.

Comme la force à dépenser, d'après ce que nous avons dit, augmente avec l'amplitude des oscillations, il est nécessaire de faire cette détermination pour les diverses amplitudes en usage. Toutefois, nous ne croyons pas devoir dépasser l'amplitude de 6°, que l'on s'accorde généralement à considérer comme la limite supérieure des demi-oscillations d'un pendule, établi dans de bonnes conditions pratiques.

Pour simplifier les calculs, nous prendrons, comme exemple, le pendule n° 2, de la page 98, qui bat la seconde et qui pèse 2400 grammes.

A l'aide de l'échelle des impulsions de la page 99 ou du tableau qui vient à la suite, il est facile de déterminer la force d'impulsion de ce pendule aux différentes amplitudes. Nous trouvons ainsi les résultats suivants :

Amplitude.	6°,	5°,	4°,	3°,	2°,	1°.
Force d'impulsion. . . .	250gr,	208gr,	167gr,	125gr,	84gr,	42gr.

En nous reportant à la troisième colonne du tableau de la page 98, nous voyons que le pendule dont il s'agit perd son 6e degré d'amplitude en 8 minutes ou 480 oscillations; par conséquent, il perd, pendant ce temps, $250 - 208 = 42$ grammes de sa force impulsive, ce qui correspond à une perte moyenne, par chaque oscillation, de $\frac{42}{480} = 0^{gr},0875$.

La perte du 5e degré a lieu en $9^m,45$ ou 585 oscillations ; la perte moyenne d'impulsion, pour chaque oscillation, est donc de $\frac{208 - 167}{385} = \frac{41}{585} = 0^{gr},0700$.

En continuant de la même manière, on trouve que, pour les autres degrés, les pertes moyennes d'impulsion sont représentées respectivement par $0^{gr},0500$, $0^{gr},0370$, $0^{gr},0206$.

Il importe, d'ailleurs, de remarquer que ces résultats ne sont que des

moyennes et que théoriquement une force motrice, qui rendrait au pendule $0^{gr},0875$, par chaque oscillation, ne serait pas tout à fait suffisante pour entretenir ces oscillations à l'amplitude de 6°, tandis qu'elle serait trop grande pour les maintenir à l'amplitude de 5° seulement, mais, dans la pratique, ces moyennes peuvent être admises sans inconvénient.

Pour entretenir la continuité du mouvement du pendule, il faudrait donc appliquer, en son centre de gravité, une force impulsive égale à celle qu'il tend à perdre, par suite des résistances, et dont nous venons de déterminer la valeur pour différentes amplitudes; mais ce n'est pas ainsi que les choses se passent ordinairement. La force est restituée au pendule par la roue d'échappement, qui la reçoit elle-même du moteur. Or, les dents de cette roue agissent par pression à l'extrémité des bras de l'échappement et, dès lors, la force transmise doit être d'autant plus forte que ces bras sont plus courts. Ainsi, quand la distance du centre de suspension aux becs de l'échappement est, par exemple, le dixième de la distance du même centre au centre de gravité du pendule, la pression sur le bec doit être dix fois plus forte que si elle agissait à ce centre de gravité, de telle sorte que, pour maintenir une amplitude moyenne de 5° 1/2, la force motrice agissant sur l'échappement doit être de $0^{gr},0875 \times 10 = 0^{gr},875$.

Observations. — Dans ce qui précède, nous n'avons tenu compte que des forces absorbées par le pendule supposé libre, c'est-à-dire par les résistances que l'air et la suspension lui opposent. Mais, dans une horloge complète, il se produit un grand nombre d'autres résistances : les frottements de l'échappement et de son axe, ceux de la fourchette contre la tige du pendule, les frottements des dents et ceux des pivots des différents rouages, depuis la roue d'échappement jusqu'au moteur, les résistances passives de ce moteur lui-même, de ses poulies et de ses cordes, s'il est à poids, ou de la flexion des lames, s'il est à ressort, et enfin la conduite des aiguilles, le déclanchement des sonneries, etc.

En principe, il faudrait mesurer chacune de ces résistances et en tenir compte dans l'évaluation totale de la force motrice nécessaire. Mais c'est là une opération à peu près impraticable, en raison du grand nombre d'expériences qu'elle exigerait et de l'incertitude que comporteraient les résultats ; on conçoit, en effet, que ces résistances doivent varier entre des limites très-éloignées, suivant le degré de perfection de l'exécution et le soin apporté dans la mise en place des différentes pièces. On est donc forcément réduit, pour cette évaluation, à des règles empiriques. D'après M. Wagner, pour des pièces bien exécutées et lorsque l'amplitude se trouve comprise entre 4 et 5°, on ne s'éloigne pas beaucoup de la réalité en estimant la somme de toutes les résistances, autres que celles du pendule, à la même quantité que les résistances de ce pendule lui-même.

Travail moteur. — Dans ce qui précède, conformément à l'usage, nous avons calculé la force d'impulsion perdue par le pendule, à chaque oscillation, force qu'il faut lui restituer aussi à chaque oscillation. Mais, en réalité, comme nous l'avons déjà fait remarquer au sujet des échappements, ce qu'il importe de considérer, dans toutes les questions de dynamique, ce n'est pas la force elle-même, mais son produit par le chemin parcouru dans sa direction, ou ce qu'on appelle son *travail mécanique.* Dans le cas qui nous occupe, l'évaluation de ce travail présente un intérêt particulier et n'offre, d'ailleurs, aucune difficulté.

L'unité adoptée, en mécanique, pour la mesure du travail, est, comme on le sait, le *kilogrammètre*, c'est-à-dire *le travail nécessaire pour élever 1 kilogramme à 1 mètre de hauteur.*

Ainsi, par exemple, si une horloge qui marche 15 jours, sans avoir besoin d'être remontée, a pour moteur un poids de 8 kilogrammes, qui descende de 2 mètres en 8 jours, le travail moteur total fourni par ce poids, pendant ce temps, sera de $8^{kg} \times 2^{m} = 16$ kilogrammètres (ou 16^{kgm}). Si le pendule bat la seconde, comme le nombre de secondes, pour 15 jours est de 1296000, le travail correspondant à chaque oscillation sera égal à $\frac{16}{1.296.000} = 0^{kgm},000012$. On peut arriver au même résultat, en évaluant le travail des diverses résistances qu'il faut vaincre, pour entretenir la marche de l'horloge.

Sans entrer ici dans le détail de calculs numériques, qui ne présenteraient qu'un médiocre intérêt, nous pouvons cependant faire remarquer que de l'égalité, qui existe nécessairement entre le travail moteur d'une horloge (dont le mouvement peut être considéré comme uniforme) et le travail de toutes les résistances, on peut déduire très-simplement le travail absorbé par toutes les résistances, autres que celles du pendule proprement dit. Si l'on désigne, en effet, par T_m le travail moteur, par T_p la partie du travail résistant correspondant au pendule et par T_r l'autre partie, on a, entre ces trois quantités, la relation :

$$T_m = T_p + T_r,$$

d'où l'on tire :

$$T_r = T_m - T_p.$$

Le travail moteur T_m peut s'évaluer facilement, comme nous venons de le voir. Dans l'hypothèse précédente, il est de $0^{kgm},000012$ par chaque oscillation.

Pour évaluer T_p, supposons que le poids du pendule soit, par exemple, de 2400 grammes, sa longueur de 1 mètre et l'amplitude de ses oscillations de 4° 1/2. Sur l'échelle d'impulsion, l'angle AC*a* étant pris égal à 5°, le sinus de cet angle ou *as* est de 87 millimètres, et le cosinus du

même angle *cs*, de 996 millimètres; par conséquent la longueur A*s* est égale à 1000 — 996 = 4 millimètres.

Lorsque la lentille du pendule descend de *a* en A, la projection du chemin parcouru sur la direction de la force, c'est-à-dire sur la verticale, est de 4 millimètres, le travail du pendule, pour cette demi-oscillation, est donc de $2^k,4 \times 0^m,004 = 0^{kgm},0096$.

Si l'on suppose que l'amplitude ne soit plus que de 4°, on trouve de même que la chute verticale du pendule est réduite à $0^m,0024$ et que, par conséquent, le travail de cette chute n'est plus que de $2^k,4 \times 0^m,0024 = 0^{kgm},00576$.

La différence des deux résultats précédents, c'est-à-dire $0^{kgm},0096 - 0^{kgm},00576 = 0^{kgm},00384$ représente le travail moteur absorbé par les résistances qui s'opposent au mouvement du pendule, pendant qu'il perd son 5e degré d'amplitude. Comme, d'après le tableau de la page 98, cette absorption se produit en $9^m,45^s$ ou 585 oscillations, il en résulte que le travail moteur absorbé, pour chaque oscillation, est, en moyenne, de $\frac{0^{kgm},00384}{585} = 0^{kgm},0000064$.

En reportant cette valeur et celle de T_m dans l'équation précédente, on trouve $T_r = 0^{kgm},000012 - 0^{kgm},0000064 = 0^{kgm},0000056$.

Ici le travail des résistances, autres que celles du pendule, se trouverait avoir sensiblement la même valeur que le travail de ces dernières.

PENDULES COMPENSATEURS.

Généralités. — Pour que la marche d'une horloge soit régulière, il est indispensable que la longueur de son pendule, une fois réglée, reste invariable, c'est-à-dire que la distance entre les centres de suspension et d'oscillation n'éprouve aucun changement. Parmi les causes de variation de cette longueur, l'une des plus importantes est, comme on le sait, celle qui correspond à l'action de la température. L'emploi des pendules compensateurs a pour but d'annuler l'influence de cette action.

La compensation sérieuse d'un pendule est une opération assez délicate, et peu de constructeurs sont à même de l'effectuer d'une manière rationnelle. Nous devons ajouter que les dispositions en usage, même lorsqu'elles sont convenablement établies, offrent l'inconvénient de ralentir la marche du pendule, en remontant le centre de gravité, et d'augmenter, dans une proportion plus ou moins considérable, la résistance de l'air.

La compensation introduit donc forcément certains défauts, dont l'importance, au point de vue de la marche du pendule, est comparable, suivant quelques artistes, à celle des variations qu'entraîne l'emploi du pendule à tige simple.

Tiges de verre et de sapin. — Pour éviter ces divers inconvénients, on a proposé de conserver aux tiges des pendules une forme simple, en les composant de substances peu dilatables, telles que le verre ou le bois de sapin. La première de ces substances est malheureusement très-fragile, et c'est là un obstacle sérieux à son emploi. Quant à la seconde, elle peut rendre quelques services pour les horloges auxquelles on ne demande pas un très-grand degré de justesse, mais elle doit être absolument proscrite dans les appareils d'une extrême précision. Les tiges de sapin, à fibres bien parallèles et convenablement préparées, n'éprouvent, il est vrai, que des variations de longueur assez faibles, par suite des changements de température ($0^{mm},004$ pour 1°), mais elles sont malheureusement soumises à l'influence hygrométrique de l'air, qui produit sur elles des modifications plus fréquentes et plus énergiques que la température. L'allongement, par chaque degré de l'hygromètre, est de $0^{mm},003$ environ, lorsque les tiges sont recouvertes d'un vernis; il est un peu plus fort, lorsque cet enduit n'existe pas. Il résulte de là qu'un pendule à tige de sapin, installé de manière à subir les influences des variations hygrométriques de l'atmosphère (qui se produisent entre des limites beaucoup plus éloignées que celles de la température), pourra être plus irrégulier que s'il était formé d'une simple tige métallique.

Dispositifs de compensation pour les appareils de précision. — Pour les appareils de précision, les seules dispositions compensatrices que l'expérience ait consacrées, jusqu'à ce jour, sont celles de Graham et de Harrisson. Dans le pendule de Graham, la compensation est obtenue, comme on le sait (V. Moinet, t. II, p. 460), par les variations dans la hauteur d'une colonne cylindrique de mercure, qui constitue, en même temps, la masse oscillante du pendule, tandis que, dans le dispositif de Harrisson, l'invariabilité de la longueur d'oscillation est le résultat de l'antagonisme d'un certain nombre de tiges, formées de métaux dont les coefficients de dilatation sont différents.

Pendule à gril de Harrisson. — Ordinairement, on fait usage de tiges d'acier et de laiton. Dans ce cas, la théorie indique que, pour un pendule à secondes, il convient que la longueur totale des tiges de laiton soit très-sensiblement de $1^{m},55$ et celle des tiges d'acier de $2^{m},54$; ces deux nombres sont inversement proportionnels aux coefficients de dilatation du laiton et de l'acier, qui sont respectivement de $0^{mm},011$ et $0^{mm},018$ par mètre. On a, en effet :

$$1,55 \times 0,018 = 2,79 = 2,54 \times 0,011.$$

Or, comme, d'après la disposition indiquée par Harrisson, ces longueurs métalliques doivent être comprises dans la longueur d'oscillation, qui,

pour la latitude de Paris, est de $0^{m},994$ environ, on se trouve forcément conduit à fractionner les longueurs précédentes et à porter à neuf le nombre des tringles métalliques, attendu que, pour assurer une action symétrique dans la compensation, on doit associer par paire chaque longueur de tringle.

Le pendule à gril est exposé à des irrégularités assez fréquentes, qui sont la conséquence du grand nombre de points de contact. C'est pour atténuer cet inconvénient que l'on a cherché à restreindre le nombre des tringles, en faisant usage de métaux dont les coefficients de dilatation fussent aussi différents que possible. En remplaçant le laiton par le zinc, qui est le plus dilatable de tous les métaux ($0^{mm},030$ à $0^{mm},034$ par mètre), on a pu réduire le nombre des tringles à cinq et même à trois, comme, par exemple, dans les pendules de U. Jurgensen et Duchemin (V. Moinet, t. II, p. 460). Pendant longtemps, le zinc ne fut employé qu'avec réserve, parce qu'on avait constaté que sa dilatation était irrégulière et se faisait par saccades. Ce défaut, qui tenait à la texture cristalline des tiges de zinc livrées par le commerce, n'est plus à redouter aujourd'hui. Grâce aux progrès réalisés dans la fabrication de ce métal, il est facile d'obtenir des tiges parfaitement malléables et exemptes de toute trace de cristallisation.

Pendule compensateur tubulaire de Troughton. — Ce pendule, dont la disposition est aussi élégante qu'ingénieuse, présente beaucoup d'analogie avec le pendule à neuf branches d'Harrisson. Les quatre tiges de laiton sont remplacées par deux tubes du même métal, jouant l'une dans l'autre et renfermant à l'intérieur les cinq tiges d'acier.

En partant du ressort de suspension (*fig.* 1, Pl. VIII), on rencontre d'abord un fil d'acier central, passant librement à travers les deux disques supérieurs, qui forment les fonds des deux tubes de laiton, et supportant, au moyen d'une clavette, le disque inférieur du plus petit de ces tubes. A ce même disque sont fixées deux autres tiges d'acier, qui supportent également, par des clavettes, le disque inférieur du plus grand tube. Le fond supérieur de ce tube porte les deux autres fils d'acier, qui, après avoir traversé librement les trois autres fonds, viennent se fixer, par le bas, à une traverse, sur laquelle la lentille est assujettie par son centre, au moyen d'une cheville.

Les deux paires de tiges d'acier sont à égale distance de la tige centrale et leurs plans se coupent à angle droit. Le diamètre des fils d'acier est de $2^{mm},5$ et celui du tube intérieur de 15 millimètres.

Cette disposition permet, comme on le voit, de réduire notablement le volume de la compensation, tout en conservant au système une rigidité suffisante.

Pendule compensateur de Tiede. — La substitution du zinc au laiton a

conduit un horloger allemand, Tiede, à des dispositifs encore plus simples, qui sont représentés par les *fig.* 5 et 6 (Pl. VII) et dont la description se comprend facilement d'après celle que nous venons de donner.

Dans la disposition indiquée par la *fig.* 5, tout se réduit à l'emploi d'un tube de zinc, renfermant dans son intérieur une tige d'acier.

Dans la *fig.* 6, c'est une tige de zinc pleine qui produit la compensation; pour la symétrie, on a été conduit à disposer, en dehors, deux tiges d'acier, au lieu d'une seule.

Le coefficient de dilatation du zinc varie, comme nous l'avons indiqué précédemment, entre 0,030 et 0,034, celui de l'acier étant de 0,011 à 0,012. Si nous admettons, pour fixer les idées, que le rapport de ce dernier coefficient au premier soit égal à 0,368, le calcul indique que, pour un pendule à secondes, la longueur de l'acier et du zinc doivent être respectivement $1^m,57$ et $0^m,58$, dont le rapport est l'inverse du précédent. Dans les pendules de Tiede, la longueur effective du zinc est un peu plus forte; elle est de $0^m,63$. Les ouvertures figurées en V, V' V'' (*fig.* 5) sont communes au tube de zinc et à la tige d'acier. L'introduction d'une goupille, dans l'une de ces ouvertures, permet de faire varier la longueur effective du tube de zinc, ce qui est indispensable, en raison de l'incertitude sur la valeur du coefficient de dilatation. C'est, du reste, pour ce motif, qu'on augmente presque toujours de 1/10 la valeur que donne le calcul, pour la longueur du métal qui doit produire la compensation.

Il existe un grand nombre d'autres dispositifs de compensation à trois branches, fondés sur l'emploi du zinc et de l'acier.

Les plus remarquables sont ceux de Jacob et de Wards. Comme ces appareils présentent la plus grande analogie avec celui de Tiede (*fig.* 6) et n'en diffèrent que par la disposition relative des pièces, nous jugeons inutile de les décrire ici. Nous nous bornerons donc à les signaler, en renvoyant le lecteur, pour les détails de leur construction, au ***Manuel d'Horlogerie*** de Roret.

Pendule à mercure de Graham. — Le pendule à mercure, employé pour la première fois par Graham, est encore à peu près le seul dont on fasse usage en Angleterre.

Dans ce pendule, le système compensateur se trouve relégué à la partie inférieure de la tige, de telle sorte que la compensation pourrait être imparfaite et même nulle, si la température n'était pas uniforme dans toute la tranche d'air, qui a pour épaisseur la longueur du pendule. Mais, malgré cette imperfection, l'expérience démontre que, lorsque ce pendule est établi dans les conditions indiquées par la théorie, ses fonctions sont parfaites, ce qui justifie complétement la réputation dont il jouit en Angleterre.

La description du pendule de Graham a été donnée par Moinet; nous n'y

reviendrons pas, et nous nous bornerons à indiquer le mode de calcul à employer pour déterminer les dimensions des différents organes.

Calcul d'un pendule à mercure. — La masse de la lentille étant très-considérable par rapport à celle de la tige, on peut admettre, sans erreur sensible, que le centre d'oscillation se confonde avec le centre de gravité de la lentille.

Si l'on désigne par l la longueur de la tige, par k le coefficient de dilatation de la substance dont elle est formée, lk représentera l'allongement de cette tige pour 1°, ou l'abaissement du centre de gravité de la masse du mercure.

Si maintenant h est la hauteur du mercure dans le tube, k' le coefficient de dilatation linéaire de ce liquide, une augmentation de température de 1° fera remonter le niveau du mercure dans le tube de $k'h$; la hauteur totale de la colonne, au-dessus du fond, sera donc $h+k'h$ et le centre de gravité, ou le milieu de cette colonne, sera à une distance de ce fond égale à $\frac{h+k'h}{2}$ ou $\frac{h}{2}+\frac{k'h}{2}$; comme la distance primitive était $\frac{h}{2}$, il en résulte que, pour 1°, le centre de gravité tend à se relever de $\frac{k'h}{2}$ par rapport au fond du tube.

Pour que ce centre de gravité conserve une position invariable par rapport au point de suspension, il faut et il suffit que cette quantité soit égale à la précédente, c'est-à-dire qu'on ait l'équation :

$$lk=\frac{h}{2}k'.$$

La dilatation apparente totale du mercure, donnée par les expériences de Dulong et Petit, est égale à $\frac{1}{6488}$ du volume. Si donc r est le rayon du cylindre, son volume sera $\pi r^2 h$ et sa dilatation linéaire, pour 1°, $k'=\pi r^2 h$ $\frac{1}{6448}$. En substituant dans l'équation précédente, on obtient :

$$lk=\frac{h}{2}\frac{\pi r^2 h}{6488}=\frac{r^2h^2}{4130},$$

relation qui permet de déterminer la hauteur h du mercure à verser dans la cuvette, pour établir la compensation.

Dans un grand nombre de pendules compensés d'après le système de Graham, la colonne de mercure est renfermée dans un cylindre de fer ou d'acier, au lieu d'un tube de verre. Si, par cette substitution, le pendule perd en élégance, il gagne en solidité et en qualité. Le verre, en effet, a

l'inconvénient d'être fragile et mauvais conducteur de la chaleur, de telle sorte qu'il retarde, dans une certaine mesure, l'équilibre de température qui produit la compensation, tandis que le fer, étant très-bon conducteur, est très-favorable à un établissement rapide de cet équilibre. Par contre, les réservoirs en verre, en raison de leur transparence, permettent de suivre les mouvements d'expansion ou de retrait du mercure et d'observer les bulles d'air ou les impuretés qu'il contient.

En principe, le mercure employé doit être aussi pur que possible et parfaitement purgé d'air. Les procédés à employer, pour arriver à ce double résultat, sont indiqués dans tous les traités de physique.

Les premiers pendules à mercure n'avaient qu'un seul réservoir. On en fait actuellement où le mercure est réparti dans des tubes parallèles. Cette disposition a été indiquée par Duchemin ; elle exige plus de travail et de soins pour arriver à un équilibre satisfaisant, mais, par contre, elle offre l'avantage de donner lieu à un déplacement moindre du centre de gravité de la masse mercurielle et de conduire plus rapidement à l'équilibre de la température. Elle se prête également mieux à l'ornementation.

Pendule à mercure de M. Vissière. — Comme exemple de pendule compensateur à plusieurs tubes parallèles, nous avons reproduit (*fig.* 2 et 3, Pl. VIII) la disposition élégante adoptée par un habile artiste français, M. Vissière.

Sur la *fig.* 2, qui est à demi-grandeur d'exécution, on n'a représenté, en raison de la symétrie, que la moitié des tubes, qui sont au nombre de quatre. Ces tubes, en verre, sont maintenus, par le haut, dans un double collier, relié à une tringle verticale *lk*, qui, à la partie inférieure, se relie elle-même à l'étrier *dcc*, monté sur la tige de suspension AB. Cette tige, qui est en acier, est représentée séparément dans la *fig.* 3 ; l'écrou qu'elle porte, à sa partie inférieure, permet d'élever ou d'abaisser l'étrier *dcc* et, par suite, d'amener, dans une position convenable, le centre de gravité de la lentille, formée ici des quatre tubes à mercure et des pièces qui les supportent.

Remarque. — Avec tous les pendules compensateurs, quel que soit leur système, mais surtout avec les pendules à gril, il est impossible d'empêcher la flexion et l'affaissement produits par le poids, relativement considérable, de la lentille. Ce poids tend constamment à déformer les tiges et, comme son action est incessante, elle finit par exercer, à la longue, une influence qui n'est pas négligeable, de telle sorte qu'un pendule réglé à un certain moment ne l'est plus au bout de quelques années. Il est donc utile de laisser les pièces produire une partie de leur effet, avant de procéder à un premier réglage. Il convient, d'ailleurs, de vérifier ce réglage, au bout d'un certain temps, et de le corriger, s'il en est besoin.

ES PIÈCES INTERMÉDIAIRES ENTRE LE PENDULE ET LE MOTEUR.

Généralités. — Dans les appareils à mesurer le temps, le régulateur est la pièce capitale, puisque c'est d'elle que dépendent la sûreté de la marche, l'exactitude et la précision des indications fournies par l'instrument. Mais, entre ce régulateur et le moteur, il existe un grand nombre d'autres pièces, qui, bien que secondaires, ne sont pas cependant sans influence sur la marche générale. Ces pièces, mal entendues ou mal exécutées, peuvent introduire des perturbations nuisibles. Nous croyons donc utile d'indiquer les précautions à prendre dans leur disposition et leur exécution, pour se mettre à l'abri de ces perturbations.

Nous ne nous occuperons pas des rouages, qui sont traités avec de grands détails dans l'ouvrage de Moinet, et nous nous bornerons à l'examen des différentes questions qui se rattachent : 1° au pince-lames de la suspension; 2° à la position du centre de mouvement de la suspension, par rapport à la face inférieure du pince-lames; 3° à l'axe de l'échappement et de la fourchette, ainsi qu'au contact de cette dernière avec le pendule; 4° au frottement de l'échappement proprement dit; 5° enfin à la solidarité du pendule avec sa tige.

Le plan dans lequel oscille le pendule doit être parfaitement vertical et l'axe de l'échappement rigoureusement perpendiculaire à ce plan.

Les bords inférieurs et les faces internes du pince-lames, contre lesquels vient s'appuyer la suspension, qu'elle soit à lames ou à soie, doivent être exactement parallèles à l'axe de l'échappement et, par suite, perpendiculaires au plan d'oscillation.

Lorsque ces conditions sont bien remplies, les frottements latéraux, qui tendent à se produire, au contact de la fourchette et de la tige du pendule, ont une valeur extrêmement faible.

De même, on réduit les frottements de la fourchette sur la tige, dans le sens vertical, en plaçant convenablement le pince-lames. Pour les suspensions à soie ou pour celles à lames d'une très-faible épaisseur, le dessous de ce pince-lames doit être exactement à la même hauteur que l'axe de l'échappement. Mais, pour les suspensions à lames d'une certaine épaisseur, il convient que la face inférieure du pince-lames soit un peu au-dessus de cet axe; la différence de niveau doit, d'ailleurs, augmenter avec l'épaisseur des lames, car le centre moyen du mouvement du pendule s'abaisse d'autant plus que cette épaisseur est plus forte. En d'autres termes, le centre moyen du mouvement doit être à la même hauteur que l'axe de l'échappement.

D'après M. Wagner, dans les pièces d'horlogerie bien entendues, il convient de placer le centre moyen du mouvement du pendule à 3, 4 et même 5 millimètres plus bas que la face inférieure du pince-lames, suivant le

plus ou moins d'épaisseur des lames. Autrement, au contact de la fourchette avec la tige, il se produirait, à chaque oscillation, un frottement nuisible à la bonne marche de la pièce.

De même, le contact de la fourchette avec la tige doit toujours avoir lieu de manière à ce que l'action transmise soit dirigée dans le plan du mouvement du pendule. Il convient, à cet effet, que le contact ait lieu sur une partie ronde ; la tige doit donc être arrondie en ce point ou porter une passe affectant cette forme.

Lorsque la passe est carrée, comme dans la plupart des pendules d'appartement, l'absence de parallélisme, qui existe presque toujours entre la fente de la fourchette de cette passe et les lames de suspension, détermine une torsion, qui nuit beaucoup à la liberté des mouvements du pendule; c'est un défaut qu'il importe essentiellement d'éviter.

L'échappement, son axe et sa fourchette étant, pour ainsi dire, solidaires du pendule et presque constamment en contact avec lui, il en résulte que leurs frottements, en absorbant une partie de la force transmise, altèrent plus ou moins la liberté de mouvement de ce pendule. Pour atténuer, le plus possible, l'influence de ces frottements, on doit donner à cette partie du mécanisme une très-grande légèreté.

Le point d'attaque de la fourchette doit se trouver à une distance du centre de suspension au moins égale au tiers de la longueur du pendule; autrement, l'impulsion que cette fourchette doit transmettre au pendule pourrait se perdre, en partie, dans le fléchissement des lames de la suspension.

Lorsque les becs de l'échappement sont placés directement sur le pendule, ainsi qu'on le fait pour quelques pièces d'horlogerie, on supprime du même coup l'axe de l'échappement, le frottement de ses pivots, la fourchette et le contact, toujours plus ou moins nuisible, de celle-ci avec la tige du pendule. C'est évidemment une simplification très-avantageuse, et il serait à désirer qu'on l'adoptât pour un grand nombre d'appareils à mesurer le temps; leur marche en deviendrait assurément plus constante et plus régulière.

Frottements de l'échappement. — Les frottements de l'échappement, proprement dit, surtout pendant les arcs supplémentaires, nuisent beaucoup à la liberté des mouvements du pendule; il importe donc de réduire, le plus possible, l'intensité de ces frottements et la durée pendant laquelle ils se produisent.

Nous avons précédemment résumé une série d'expériences très-remarquables de M. J. Wagner sur ce sujet. Dans ses essais sur le pendule, son attention s'est de nouveau portée sur cette question, et il a constaté que les frottements de l'échappement entraînaient une perte de force bien supérieure à celle qui est due à la résistance de l'air.

Pour déterminer cette influence des frottements de l'échappement, M. Wagner a pris un pendule battant la seconde et pesant 3 kilogrammes, dont la surface totale était de $0^{mq}.1600$, Sur la tige était adapté, à la partie supérieure, un bec d'échappement à repos, dont l'étendue était suffisante pour permettre au pendule un mouvement de 6°, de chaque côté de la verticale, et sur lequel on pouvait exercer une pression plus ou moins grande, à l'aide d'un levier tangent à la courbe de repos, agissant absolument comme une dent de la roue d'échappement.

Ce levier était articulé et parfaitement équilibré, comme l'est une roue d'échappement avant l'action motrice ; il était muni d'un petit plateau pour recevoir des poids, destinés à produire une pression sur le repos.

En mesurant les temps correspondant aux diminutions d'amplitude, lorsque le pendule, dégagé de tout mécanisme, oscillait en parfaite liberté, et lorsque ce même pendule supportait, sur le repos de son échappement, la pression d'un poids de 5 grammes, agissant à $0^{m},10$ du centre de mouvement, c'est-à-dire à 1/10 de la longueur de ce pendule, M. Wagner a obtenu les résultats consignés dans le tableau suivant :

DIMINUTION DE L'AMPLITUDE des demi-oscillations.	NOMBRE DE MINUTES correspondant à une diminution de 1°.	
	Pendule libre.	Pendule chargé.
	minutes.	m. s.
De 6 degrés à 5 degrés.	12	4,30
— 5 — à 4 —	14	4,30
— 4 — à 3 —	18	4,30
— 3 — à 2 —	24	4,35
— 2 — à 1 —	40	4,35
— 1 — à 0 —	180	4,40

Avec le pendule entièrement libre, les résultats consignés dans la deuxième colonne concordent avec ceux du tableau de la page 98 ; ils sont compris entre ceux de la troisième et la quatrième colonne de ce tableau, correspondant aux pendules de 2400 grammes et 4800 grammes, entre lesquels se trouve compris le pendule de 3000 grammes de l'expérience actuelle.

Les nombres de la troisième colonne correspondent au pendule oscillant avec une pression de 5 grammes sur le repos du bec d'échappement, pression qui est très-sensiblement équivalente à celle d'un échappement ordinaire à repos ou à recul. On voit que, dans ce cas, chaque degré de l'amplitude a été perdu, à quelques secondes près, dans le même temps, 4 minutes et demie. Il en résulte que la quantité de force motrice absorbée par le frottement de cet échappement est toujours proportionnelle à l'amplitude des oscillations et, par suite, à la force d'impulsion du pendule.

En répétant ces expériences un grand nombre de fois, avec des pendules de poids différents et avec des pressions différentes sur le repos, M. Wagner a toujours obtenu des résultats du même genre, c'est-à-dire qu'il a toujours constaté que la perte de chaque degré de l'amplitude se faisait dans le même nombre de minutes ; nous n'avons pas besoin d'ajouter que ce nombre était variable avec le poids du pendule et la valeur de la pression exercée sur le repos.

La force absorbée par les frottements varie nécessairement avec la longueur des bras d'échappement, la longueur et le poids du pendule ; mais on peut admettre qu'elle est toujours quatre ou cinq fois plus grande que celle qui correspond à la résistance de l'air. Dans les pièces de précision, ces pertes sont aussi réduites que possible, mais, dans les pièces ordinaires, il n'en est pas toujours ainsi ; c'est un point auquel on ne saurait apporter trop d'attention.

Assemblage de la tige et de la lentille. — La tige et la lentille d'un pendule doivent être parfaitement solidaires, et il importe, pour arriver à ce résultat, de prendre certaines précautions. Généralement la tige, quelle que soit sa forme, plus ou moins compliquée, se termine, à sa partie inférieure, par une partie taraudée, munie d'un écrou, destiné à retenir la lentille, qui entre à coulisse sur la tige. Cette disposition permet de régler la longueur du pendule, en remontant ou en descendant la lentille, jusqu'à ce qu'on ait atteint le nombre d'oscillations voulu, d'après les rouages qui mènent les aiguilles indicatrices de l'heure.

L'ajustement de la lentille sur la tige doit être rigoureux, c'est-à-dire qu'il ne doit pas y avoir de jeu dans la coulisse ; autrement, si la lentille avait trop d'ébat, si elle reposait simplement sur l'écrou, elle pourrait, à chaque oscillation, se rejeter en sens inverse du mouvement et occasionner ainsi des perturbations, qu'il y a grand intérêt à éviter.

Il importe également de ne pas exposer le pendule d'une horloge à un courant d'air, qui, en agissant sur la lentille, troublerait les fonctions de ce pendule. C'est pour la même raison que les pendules de salon doivent être renfermées, afin de les soustraire aux agitations de l'air et, en même temps, pour préserver les rouages de la poussière et de l'humidité.

ISOCHRONISME DES OSCILLATIONS DES PENDULES.

Nous avons dit précédemment que les oscillations d'un pendule simple n'étaient pas rigoureusement isochrones, quand les amplitudes étaient différentes, et nous avons indiqué les raisons théoriques de ce défaut d'isochronisme.

Parmi les différentes tentatives faites pour remédier à ce défaut, nous avons déjà cité celle d'Huyghens, consistant dans l'emploi de courbes

cycloïdales. Ces courbes, qui théoriquement constituent une solution parfaite, présentent en pratique, comme nous l'avons vu, d'assez graves inconvénients, et l'on n'a pas tardé à y renoncer.

En 1845, MM. Laugier et Winnerl, dans un mémoire à l'Académie des Sciences, reproduit dans l'ouvrage de Moinet (p. 492, t. II), ont indiqué le moyen de résoudre la question par la résistance même des lames de suspension, en faisant ces lames plus ou moins épaisses, suivant le poids du pendule, sa longueur et l'amplitude des oscillations.

Il est facile de comprendre que plus ces lames sont épaisses, plus elles opposent de résistance à la flexion, et plus alors elles limitent l'étendue des arcs d'oscillation, en même temps qu'elles précipitent le retour du pendule, par suite de la tension due à la flexion.

D'un autre côté, plus ces lames sont épaisses, moins prononcée est la courbure qu'elles prennent, à partir du pince-lames. Il en résulte que la distance du centre de mouvement au centre d'oscillation, ou la longueur du pendule, diminue à mesure qu'on s'éloigne de la verticale. Pour tous ces motifs, en proportionnant convenablement les différents éléments d'un pendule, il est possible d'arriver à l'isochronisme des oscillations. Toutefois, cette solution ne peut pas être considérée comme tout à fait satisfaisante, car elle exige de nombreux tâtonnements, qu'il faut recommencer, en quelque sorte, pour chaque pendule.

Quelques artistes ont cherché à résoudre le problème par l'emploi de ressorts, placés sur les côtés de la tige du pendule, à une hauteur déterminée par tâtonnements. La réaction de ces ressorts sur la tige est naturellement d'autant plus énergique que l'amplitude est plus forte, et l'on comprend qu'on puisse parvenir ainsi à un isochronisme assez approché.

M. Wagner a cherché la solution du même problème dans l'addition d'un petit pendule auxiliaire, relié au grand et mis en mouvement par lui. Ces deux pendules étaient conjugués dans des conditions telles que, pour un accroissement dans l'amplitude des oscillations, les arcs parcourus par le petit pendule augmentaient dans une proportion plus forte que ceux du grand. Par conséquent, lorsque ce dernier pendule tendait à faire des oscillations d'une amplitude trop considérable, il était sollicité par le petit pendule à revenir vers la verticale, avec une puissance d'autant plus énergique que l'augmentation d'amplitude était plus sensible.

Ces diverses solutions et d'autres encore, qu'il nous paraît inutile de mentionner, permettent d'approcher plus ou moins du but qu'on doit se proposer; mais elles n'ont rien de général et ne constituent pas, à proprement parler, des méthodes.

Dans la première, la forme des courbes directrices, dans la seconde, l'épaisseur des lames de suspension, dans la troisième, l'élasticité et la position des ressorts, enfin, dans la dernière, la longueur et le poids du

pendule auxiliaire, nécessitent des expériences longues et coûteuses, qu'il est à peu près indispensable de recommencer chaque fois.

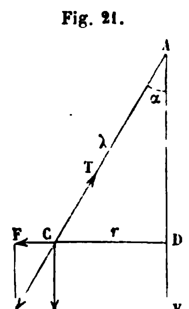
La découverte d'une méthode qui permettrait d'arriver au résultat cherché, d'une manière sûre et suffisamment simple, constituerait, pour l'horlogerie, un progrès d'une sérieuse importance.

DU PENDULE CONIQUE.

Définitions. — Lorsqu'un pendule simple, écarté de la verticale, au lieu d'être abandonné à lui-même, sans vitesse initiale, reçoit une impulsion dans le sens horizontal, il décrit une série d'oscillations coniques et, quand l'angle d'écart est suffisamment petit, la durée de chaque révolution peut être considérée comme à peu près indépendante de cet angle.

Si l'on imagine un pendule formé d'un simple point matériel C (*fig.* 21), suspendu à un fil inextensible et sans pesanteur, de longueur λ, qu'on l'écarte de la verticale et qu'on lui donne une impulsion horizontale, perpendiculaire à la plus courte distance CD du point C à la verticale AV du point de suspension, le point C décrira un cercle, et il est facile d'établir la relation qui doit exister entre les différents éléments du pendule, dans le cas d'un mouvement continu et uniforme.

Fig. 21.



A cet effet, remarquons que le point matériel C est sollicité par trois forces, qui, dans l'hypothèse du mouvement uniforme, doivent se faire équilibre et qui sont la tension du fil, la force centrifuge et la gravité, dirigées respectivement suivant CA, CF et CP. Pour l'équilibre, il faut et il suffit que les deux forces CF et CP aient une résultante égale et directement opposée à la troisième; en d'autres termes, si l'on construit le parallélogramme des forces sur ces deux lignes, la résultante CR doit se confondre avec la direction du fil. La masse du point matériel étant supposée égale à l'unité, l'action de la gravité est représentée par g et la force centrifuge par $\omega^2 r$, en désignant par ω la vitesse angulaire de rotation par seconde. Dans le triangle rectangle RPC, le côté RP, ou $\omega^2 r$, est égal à l'autre côté de l'angle droit CP ou g, multiplié par la tangente de l'angle opposé. On a donc :

$$\omega^2 r = g . \text{tang}\, \alpha.$$

Or, dans le triangle rectangle CAD, on a également $r = \text{AD}\tan\alpha$ et, en remplaçant r par cette valeur, la relation précédente devient :

$$\omega^2.\text{AD}.\tan\alpha = g.\tan\alpha,$$

ou

$$\omega^2.\text{AD} = g.$$

Si maintenant on désigne par T la durée d'une révolution complète, ω peut être exprimé par $\frac{2\pi}{T}$ et, en substituant, on obtient :

$$\frac{4\pi^2}{T^2}.\text{AD} = g,$$

ou

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\text{AD}}{g}},$$

ou encore, en remplaçant AD par sa valeur $\lambda\cos\alpha$:

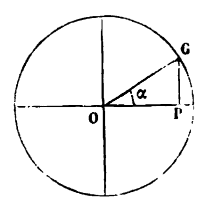
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\lambda\cos\alpha}{g}}.$$

Lorsque l'angle d'écart α est assez petit pour qu'on puisse, sans erreur sensible, remplacer le cosinus (*) par l'unité, cette formule montre que la durée d'une révolution complète est le double de celle d'une oscillation simple du pendule ordinaire. Par conséquent, dans le cas d'un angle d'écart assez faible, la longueur du pendule conique à secondes doit être le quart de celle du pendule ordinaire à secondes, c'est-à-dire $\frac{0^m,994}{4}$ ou $0^m,25$ environ et non $0^m,50$, comme l'indique Moinet (p. 451, t. II).

Lorsque l'angle d'écart n'est pas suffisamment petit, il faut tenir compte du cosinus de cet angle, qui figure sous le radical. Comme ce cosinus diminue, lorsque l'angle augmente, la formule précédente montre que la durée de l'oscillation devient de plus en plus faible, à mesure que l'angle d'écart devient plus considérable.

(*) Dans un cercle décrit avec un rayon égal à l'unité, le cosinus d'un angle GOP $= \alpha$ est la ligne OP, comprise entre le centre O et le pied de la perpendiculaire abaissée du point G. A mesure que l'angle α tend vers O, le cosinus se rapproche de plus en plus de l'unité. Lorsque l'angle α augmente, le cosinus diminue, et pour $\alpha = 90°$, il est égal à O. Le sinus de l'angle α est, comme nous l'avons dit, la ligne GP ; ce sinus augmente avec l'angle et pour $\alpha = 90°$, il est égal à 1.

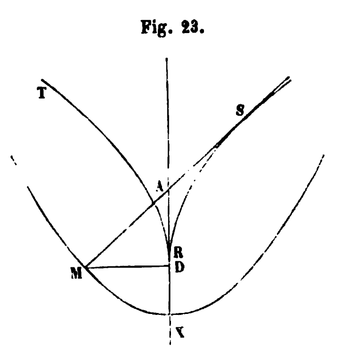
Fig. 22.



En continuant à faire abstraction des résistances de la suspension, des frottements et de la résistance de l'air, on peut déduire de la même formule que, pour qu'un pendule conique fût isochrone, c'est-à-dire que la durée des oscillations fût constante, quelle que soit l'amplitude, il faudraît arriver à rendre constante l'expression $\lambda \cos \alpha$. Comme cette expression est la projection AD de la longueur λ sur l'axe vertical, ou, comme on dit, la hauteur du pendule, on voit qu'il est possible de résoudre le problème de l'isochronisme, en adoptant une disposition qui conserve toujours la même valeur à cette hauteur du pendule, quel que soit l'angle d'écart.

Pendule à pirouette de Huyghens. — La première disposition proposée pour réaliser l'isochronisme, est celle que Huyghens a fait connaître dans son horloge paraboloïde et qui reposait sur la propriété de la parabole d'avoir une sous-normale constante (*).

Fig. 23.



L'axe du dernier mobile du rouage de cette horloge était vertical et tournait librement sur ses deux pivots; il avait une longueur supérieure à celle du pendule lui-même et devait être assez fort pour en supporter tout le poids. Le pendule était fixé au bord libre d'une lame que cet axe portait sur son côté et dont le profil était une développée de parabole.

Pour gagner son point d'attache, la tige du pendule, qui était formée d'un fil ou d'une lame très-flexible, passait à travers une fente verticale pratiquée dans l'axe.

Dans son mouvement de rotation, l'axe entraînait le pendule, qui, par l'effet de la force centrifuge, s'éloignait plus ou moins de la verticale ; sa longueur réelle, comptée à partir du point où sa tige se dégageait

(*) AX étant l'axe d'une parabole, M un point quelconque sur cette courbe, la sous-normale est la longueur AD, comprise entre les points de rencontre avec l'axe de la normale à la courbe au point M et de la perpendiculaire abaissée de ce même point sur cet axe. On démontre, en géométrie, que cette longueur AD est constante, quelle que soit la position du point M. D'un autre côté, les diverses normales à la parabole déterminent, par leurs intersections successives, une courbe TRS, qui porte le nom de *développée* de la parabole et qui, d'après son mode même de génération, jouit de la propriété d'être tangente à toutes les normales aux différents points de la parabole.

Si l'on suppose la tige d'un pendule flexible et attachée en un point quelconque de cette développée et qu'on donne à ce pendule, ainsi qu'à la parabole, un mouvement de rotation autour de l'axe AX, le centre M de la boule du pendule restera toujours sur cette parabole. Suivant l'amplitude, la tige sera plus ou moins enroulée sur la développée, mais, à partir du point de contact S, elle sera dirigée suivant une normale à la parabole ; la sous normale étant constante, comme elle représente précisément la *hauteur du pendule*, il en résulte que cette disposition assure théoriquement l'isochronisme des oscillations.

des bords de la fente, pouvait ainsi varier, mais sa projection sur la verticale (la hauteur du pendule) restait constante, de telle sorte que, théoriquement du moins, la durée des oscillations devait rester la même.

Malgré sa disposition ingénieuse, le pendule conique d'Huyghens, de l'aveu même de son auteur, n'a jamais fonctionné d'une manière satisfaisante. Le pendule, pesant de tout son poids sur l'axe qui lui communiquait le mouvement, devait être relativement très-léger ; mais son poids étant peu considérable, ses oscillations devaient être très-étendues, et, pour conserver l'isochronisme, il fallait, comme nous l'avons dit, faire varier sa longueur, en faisant enrouler ou dérouler sa tige flexible sur une développée de parabole.

Pendule de Foucault. — La découverte d'Huygens remonte à l'année 1673, mais, jusqu'à ces derniers temps, elle n'avait été l'objet d'aucune application sérieuse et durable. Ce n'est, en effet, qu'en 1847 que le savant physicien Foucault présenta à l'Académie des sciences un appareil destiné à produire une espèce particulière de mouvement uniforme, continu et mesuré, tel que celui qu'exige, par exemple, la conduite d'une machine parallactique.

Cet appareil était, en réalité, un modèle d'horloge, dans lequel le pendule ordinaire se trouvait remplacé par un pendule conique, ce qui avait permis de supprimer l'échappement et d'éviter, par suite, les pulsations qui en sont la conséquence. Le pendule pouvait ainsi être maintenu constamment en relation avec le rouage, qui défilait d'une manière continue.

Par l'emploi d'un mode de suspension analogue à celui de Cardan, mais d'une construction plus simple et plus facile que celui en usage jusque-là, Foucault était arrivé à avoir un pendule animé d'un mouvement circulaire, autour de la verticale abaissée du point de suspension.

Ce pendule recevait l'action de la force motrice de la manière suivante : le dernier mobile du rouage était placé verticalement au-dessus du point de suspension et portait, à son extrémité inférieure, laissée libre, une sorte de doigt, qui venait presser sur l'extrémité supérieure de la tige du pendule, convenablement prolongée en dessus. Il semble, au premier abord, que l'action de ce doigt devait avoir pour résultat de faire abandonner peu à peu au pendule la marche circulaire, pour n'y plus revenir. Mais l'expérience a démontré qu'il n'en était pas ainsi. D'après l'auteur, la stabilité, qu'on observait dans la marche de l'appareil, devait avoir pour cause efficace le frottement d'un genre particulier, qui accompagnait nécessairement l'action du doigt.

La masse du pendule était constituée par une forte pièce métallique centrée sur la tige ; celle-ci était prolongée en dessous par une verge cylindrique, d'un petit diamètre et d'une certaine longueur.

Quand l'horloge était en marche, cette verge délimitait, par son mouvement, un espace circulaire, dans lequel on avait monté un plateau, dont le centre se trouvait sur la verticale abaissée du centre des mouvements du pendule.

Avec cette disposition, si la force motrice venait à manquer, le pendule s'arrêtait et, au lieu de se rapprocher insensiblement de la verticale, il venait reposer, par le prolongement inférieur de sa tige, sur l'un des points du pourtour du plateau, de telle sorte que, même à l'état de repos, le pendule se trouvait dévié de la verticale d'un angle déterminé par le rayon de ce plateau. On empêchait ainsi l'extrémité supérieure de la tige de venir choquer et fausser l'axe délicat du dernier pignon.

En outre, la machine étant remontée, ce plateau permettait de lancer le pendule circulairement et d'une manière beaucoup plus sûre qu'on n'aurait pu le faire à la main. En tournant ce plateau avec une vitesse graduellement croissante, il arrivait un moment où le pendule, abandonnant son bord, continuait de lui-même à marcher circulairement.

Pendule de Pecqueur. — Dans la même année 1847, Pecqueur a présenté à l'Académie des Sciences un pendule conique, dans lequel l'isochronisme des oscillations était réalisé par l'empoi de ressorts à boudin.

Nous avons vu précédemment que la durée des révolutions d'un pendule conique devait rester la même, quelle que fût l'amplitude, lorsque la hauteur de ce pendule était maintenue constante. C'est ce qui arriverait, par exemple, avec un pendule ayant la propriété de s'allonger ou de se raccourcir, de telle sorte qu'en lui faisant décrire des cônes plus ou moins ouverts, son centre d'oscillation restât constamment dans le plan horizontal comprenant le centre d'oscillation du même pendule supposé au repos.

D'un autre côté, la quantité dont le pendule conique doit s'allonger, pour que sa hauteur reste la même, quand l'angle vient à varier pour une cause quelconque, est proportionnelle à la tension de la tige, qui, comme nous l'avons vu (page 122), doit être égale à la résultante du poids et de la force centrifuge.

En rapprochant ces deux lois de la propriété que possèdent les ressorts à boudin de s'allonger proportionnellement à la charge qu'ils supportent, Pecqueur avait été amené à cette conclusion que, pour assurer l'isochronisme, il suffisait de rendre la longueur de la verge variable, en suspendant la lentille à un ressort, dont les allongements seraient proportionnels à la résultante dont il vient d'être question.

Sans entrer dans le détail des dispositions adoptées, pour réaliser l'application de ces principes, et des précautions prises pour éviter les frottements, nous nous bornerons à faire remarquer que le mouvement circulaire du pendule était assuré au moyen d'un petit poids, placé à l'extrémité

du levier, qui transmettait la force motrice au prolongement supérieur de la tige de suspension de ce pendule.

D'après Pecqueur, son pendule marchait dans des conditions satisfaisantes, pour des ouvertures de l'angle au sommet du cône comprises entre 5 et 60°, la puissance motrice variant elle-même en intensité depuis 1 jusqu'à 30.

Pendules de MM. Balliman et Laurendeau.—A l'Exposition universelle de 1855, à Paris, M. Balliman a présenté plusieurs échantillons de pendules réglées par un pendule conique. Un simple fil d'acier très-fin supportait la lentille, fort légère, qui oscillait au-dessus du mouvement.

A peu près à la même époque, M. Laurendeau, de Bordeaux, faisait plusieurs applications du pendule conique aux horloges publiques du département de la Gironde. La lentille, qui était très-lourde (25 à 30 kilog.), était suspendue également par un simple fil d'acier rond; le mouvement circulaire du pendule était assuré par un doigt, fixé sur le dernier mobile et agissant sur l'extrémité de la tige.

Pendule de M. Vérité. — En 1859, M. Vérité, de Beauvais, a exposé, à Rouen, une horloge électrique, réglée par un pendule conique. Le temps d'une révolution complète était d'une seconde, c'est-à-dire que la longueur de ce pendule était celle du pendule ordinaire à demi-secondes, ou $0^{m},25$ environ. Le mouvement circulaire était entretenu par un électro-aimant et les tours venaient se compter, au moyen de fils électriques, sur un cadran éloigné du régulateur. M. Vérité a construit plusieurs pendules de ce genre, qui ont toujours fourni des marches excellentes. Dans tous, la suspension se composait d'un fil d'acier rond ou d'une fine corde à boyau.

Expériences de M. Redier. — M. Redier a entrepris une série d'expériences, afin de déterminer les conditions dans lesquelles doit être établi le pendule conique. Les résultats de ces essais sont consignés dans une brochure publiée par l'auteur (*), et que nous allons essayer de résumer.

Influence du poids des lentilles. — En employant comme lentille un cylindre de laiton, mobile dans le sens de son axe et dont il pouvait faire varier le poids, en le remplissant plus ou moins de grenaille de plomb, M. Redier a pu mesurer l'influence du poids sur l'étendue des cercles d'oscillation.

Pour une lentille de		500^{gr}	l'angle du cône décrit était de				5°.
—	—	1.500^{gr}	—	—	—	—	4°.
—	—	2.500^{gr}	—	—	—	—	$3°\,{}^1/_2$.

(*) *Mémoire sur le pendule conique et sur les nouveaux instruments chronométriques auxquels il est appliqué*, par A. Redier.

Ces expériences prouvent qu'il y a avantage à employer des lentilles lourdes, puisque les arcs ne varient que de 1 à 2°, pour une différence aussi notable dans les poids.

Effets des variations de la force motrice. — L'expérience la plus concluante en faveur du pendule conique est celle de la variation de l'horloge, suivant la variation de la force motrice et, par suite, de l'étendue du cercle décrit.

Les résultats suivants sont les moyennes d'un grand nombre d'expériences.

Poids moteur.	Arc décrit.	Avance en 24 heures.
6 kilog.	4°	+ 20″,8
5 —	3° 1/2	+ 14,″8
2 —	2°	0″,8

Ces résultats ne diffèrent pas notablement de ceux qu'on trouve avec le pendule plan ; seulement, pour ce dernier, les erreurs sont de signes contraires. Ainsi, par exemple, pour l'arc de 4°, le retard, avec le pendule plan, serait de 26″.

Modes de suspension. — Les différents modes de suspension, proposés pour le pendule conique, peuvent se ramener à trois :

La suspension à couteaux à la Cardan ;

La suspension par un simple fil d'acier rond ;

La suspension à lames à la Cardan.

La suspension à couteaux présente divers inconvénients, et les essais qu'on en a faits ont donné des résultats peu satisfaisants.

La suspension par un simple fil d'acier, employée par MM. Balliman et Laurendeau, est excellente, mais n'offre pas les mêmes ressources que celle à lames, au point de vue de la concentricité des révolutions. Sous ce rapport, l'emploi d'un fil carré présente quelques avantages, car il est toujours possible d'amincir le côté qui produit le grand axe de l'ellipse.

La *fig.* 4 (Pl. VIII), donne le tracé de la suspension à lames, proposée par M. Redier. Les quatre lames de suspension sont à la même hauteur, condition d'une grande importance, au point de vue de la longueur rigoureuse du pendule.

Dans ce système, l'angle droit formé par les deux suspensions, peut être modifié et servir à la recherche de la concentricité des oscillations.

Cette suspension présente aussi l'avantage de la solidité ; un simple fil est bien fragile, et l'on n'évite pas toujours les effets de torsion.

La suspension à quatre lames est certainement la meilleure, et, malgré ses difficultés d'exécution, doit être adoptée pour les pièces de précision.

Concentricité des oscillations. — Il est essentiel que le pendule décrive des cercles rigoureusement concentriques à la tige qui le conduit ; autrement, la marche de l'aiguille des secondes ne serait pas uniforme. L'examen de cette marche permet de constater facilement le moindre défaut de concentricité.

Lorsque le pendule est bien symétrique et que toutes les lames sont de même épaisseur, cette concentricité peut se trouver réalisée immédiatement ou, du moins, n'exige que quelques retouches de peu d'importance. Si, par exemple, le pendule décrit une ellipse, comme le grand axe a une direction constante, il suffit d'amincir les lames correspondant à cette direction, pour transformer l'ellipse en cercle.

La plupart de ceux qui se sont occupés du pendule conique ont cherché à résoudre le problème de la concentricité des cercles décrits, en gênant plus ou moins le pendule.

Dans l'appareil de Foucault, cet effet était plus ou moins réalisé par le frottement du levier qui conduisait le doigt. Dans celui de Pecqueur, le petit poids, dont était chargé le levier conducteur, avait également pour but de produire un certain frottement sur la tige du pendule. Enfin M. Laurendeau, en faisant passer la tige de son pendule dans une coulisse, ménagée sur le levier conducteur, produit un frottement, destiné à s'opposer aux variations brusques dans le cercle décrit par le pendule.

Ces frottements, dont l'intensité est naturellement variable, présentent des inconvénients, analogues à ceux que nous avons signalés à l'article des échappements. Nous devons ajouter, d'ailleurs, qu'avec l'emploi d'un frottement quelconque, comme mode de régularisation, le pendule exige une force motrice beaucoup plus considérable, pour conserver la même étendue dans les oscillations.

M. Balliman obtient la concentricité par l'emploi d'une puissance motrice suffisante pour faire décrire au pendule des cônes de 10 à 15°.

Avec de grands arcs et des lentilles légères, il ne redoute pas le changement d'étendue dans les cercles décrits.

Conclusions. — Des considérations précédentes et de ses propres expériences, M. Redier a cru pouvoir déduire les conclusions suivantes : 1° Le pendule conique est un bon régulateur ; 2° suspendu par quatre lames de ressort à la Cardan, il présente d'excellentes conditions de concentricité ; 3° pour assurer cette concentricité, il ne faut pas hésiter à lui faire décrire des cercles d'une certaine étendue, sans dépasser toutefois 6 à 8° ; 4° une tige de sapin évite d'avoir recours à la compensation (sous la réserve des observations de la page 110).

L'emploi du pendule conique, conduisant à la suppression de l'échappement, paraît de nature à simplifier la construction d'une horloge. Toutefois, cette simplification est plus apparente que réelle. Deux mobiles de

plus, dont l'un nécessite un engrenage de champ, représentent sensiblement la valeur d'un échappement; le levier mobile, qui fait au moins trente tours par minute, ne tarde pas à absorber beaucoup de force motrice, par suite de l'altération de son huile et de ses pivots; enfin, la nécessité de placer le pendule au-dessus du mouvement est défavorable à la solidité de l'ensemble de l'appareil.

Pour toutes ces raisons, le pendule conique ne paraît pas pouvoir être substitué, avec avantage, au pendule plan, pour les horloges ordinaires, et il doit être réservé pour quelques usages spéciaux, où il est nécessaire d'avoir un mouvement continu d'une aiguille. C'est ainsi qu'il a été utilement appliqué dans certains compteurs de précision. Parmi ces applications, celles qui sont dues à M. Redier sont particulièrement remarquables, et nous croyons utile d'en dire quelques mots.

APPLICATIONS DU MOUVEMENT UNIFORME FOURNI PAR LE PENDULE CONIQUE.

Horloge à temps sidéral et à temps moyen. — Plusieurs combinaisons ont été proposées pour faire marquer à la même horloge le temps sidéral et le temps moyen. En 1823, MM. Pecqueur et Pierrelet présentèrent chacun un régulateur de ce genre. Celui de Pierrelet a été indiqué par Moinet (page 337, t. II). Réglé par un pendule plan, il présentait l'inconvénient que l'aiguille, marquant la seconde sidérale, frappait tantôt sur une division, tantôt entre deux divisions. Dans l'horloge de Pecqueur, ce défaut était corrigé par l'emploi d'un rouage différentiel. L'emploi du pendule conique a fourni à M. Redier une solution très-simple de ce problème.

M (*fig.* 5, Pl. VIII) est l'axe de la roue de secondes, temps moyen, et S l'axe de la roue de secondes, temps sidéral. Ces deux axes sont conduits par un moteur et un rouage spéciaux; à la suite de M ou de S, se trouve le rouage complémentaire, calculé pour conduire le pendule, de telle façon que, si l'on emploie le pendule à secondes moyennes pour régler l'ensemble, le rapport des vitesses entre M et l'axe conducteur du pendule soit 1/30. Les quatre mobiles intermédiaires A, B, C, D, sont destinés à établir la communication entre S et M et à faire agir, par suite, les deux moteurs sur le pendule.

Les six mobiles M, S, A, B, C et D doivent être déterminés, de telle manière que le rapport des vitesses, entre M et S, soit le même que celui du temps sidéral au temps moyen, c'est-à-dire $\frac{997\,269\,566}{1\,000\,000\,000}$. En faisant usage de la méthode *de calcul des rouages par approximation de M. Brocot*, que nous indiquerons plus loin, on trouve que ce rapport peut être remplacé par le rapport approché $\frac{25\,201}{25\,270}$, qui ne correspond qu'à une erreur

annuelle de $2^s,43$, tout à fait négligeable. De ce dernier rapport on déduit, pour les engrenages des six mobiles, $\frac{35 \cdot 58 \cdot 79}{38 \cdot 57 \cdot 70}$.

Pour compléter cette horloge, on pourrait ajouter deux rouages de seconde indépendante, qui feraient frapper la seconde entière et qui pourraient servir à transmettre électriquement l'un ou l'autre des deux temps en un point quelconque d'un observatoire.

Coïncidence entre deux pendules. — Le pendule conique fournit plusieurs moyens pour mettre deux pendules en coïncidence parfaite, c'est-à-dire pour avancer ou retarder une petite pendule d'une fraction de seconde.

Imaginons un pendule conique conduit par un mouvement placé au-dessous de la lentille et supposons que ce mouvement, au lieu de conserver une position invariable au-dessous de son pendule, puisse tourner horizontalement autour de la verticale de suspension ; une rotation de ce genre n'altérera en rien la marche du pendule, mais elle permettra de modifier l'heure marquée par les aiguilles du mouvement.

Ainsi, par exemple, si le pendule fait une révolution en une seconde, et si l'on fait tourner le mouvement d'un tour entier, dans le sens opposé à celui de la marche du pendule, l'aiguille des secondes marquera une seconde de plus que si la rotation n'avait pas eu lieu. L'aiguille des secondes se trouverait, au contraire, retardée, si la rotation avait lieu dans le même sens que celle du doigt conducteur du pendule.

Un tour entier correspondant à une avance ou à un retard d'une seconde, suivant le sens dans lequel on tourne, il est évident qu'il suffira de diviser le cercle du mouvement en un certain nombre de parties égales, pour permettre de corriger l'heure de l'horloge d'une fraction de seconde.

Un inconvénient de ce procédé consiste en ce que les cadrans, tournant eux-mêmes avec le mouvement, peuvent parfois se présenter dans des positions peu commodes pour la lecture ; mais on peut, à la rigueur, y remédier, en ayant recours à un rouage supplémentaire ou à l'électricité, pour transmettre, sur un cadran fixe, l'heure, la minute et la seconde du mouvement mobile.

La *fig.* 6 (Pl. VIII) représente, d'après M. Redier, l'ensemble d'une horloge, réglée par un pendule conique et munie d'un dispositif, qui permet de la faire avancer ou reculer d'une quantité quelconque.

Le pendule PP est suspendu par quatre lames croisées à la Cardan et est conduit par un levier L, mobile autour de l'axe I. En supposant la longueur de ce pendule égale à celle du pendule ordinaire à secondes, cet axe I doit faire un demi-tour par seconde. Le rouage qui le conduit est horizontal, ainsi que le cadran, qui est muni d'une double division des heures, minutes et secondes. La première de ces divisions est suivie par

le mouvement continu, que règle le pendule, et la seconde par un rouage, semblable aux rouages des secondes indépendantes. Après chaque demi-tour du pendule, une étoile de dix dents laisse échapper le fouet du deuxième rouage, et ce fouet, en faisant instantanément un tour, détermine le battement de la seconde entière.

Comme la disposition horizontale du cadran en rend la lecture difficile, on transmet l'heure, sur le devant de l'appareil, au moyen d'un troisième rouage, disposé comme celui de la seconde indépendante.

M est une manivelle, qui sert à faire tourner le mouvement horizontal, à droite ou à gauche ; D est la lunette d'un cadran, établi sur une face latérale de la boîte et dont l'aiguille indique les quantités dont le mouvement a tourné.

Supposons maintenant que l'aiguille du cadran vertical antérieur soit en retard de $2^s \frac{36}{100}$ et qu'on veuille la faire avancer juste de cette quantité.

Le pendule faisant une révolution en deux secondes et le bras L tournant à droite, si l'on fait faire à l'ensemble du mouvement horizontal un tour entier, en sens contraire, c'est-à-dire à gauche, on produira une avance de deux secondes. Comme le cadran est divisé en 200 parties égales et que son aiguille traduit tous les déplacements du mouvement, on voit que, pour faire avancer de $2^s \frac{36}{100}$, il faudra faire exécuter à cette aiguille un tour entier, plus 36 divisions. Pour produire un retard, il suffirait, d'après ce que nous avons dit, de tourner en sens inverse. Une disposition spéciale permet, d'ailleurs, de ramener, à volonté, l'aiguille du cadran à zéro, de manière à permettre une évaluation sûre et facile de l'avance produite.

Il est bien évident que si, à chaque battement de la seconde du cadran antérieur, on détermine un contact électrique, on pourra envoyer l'heure à distance avec toute la précision désirable.

La *fig.* 7 (Pl. VIII) représente, à plus grande échelle, les principaux détails du mécanisme, dont nous venons d'indiquer les fonctions.

P, plaque carrée, de $0^m,25$ de côté, au milieu de laquelle est ajustée, à frottement gras, la grande platine du mouvement ;

C, cercle vissé sur la plaque P, pour compléter l'ajustement de la grande platine ;

L, piliers du mouvement, qui forment la cage ;

E, anneau fixé aux piliers et muni d'une denture de champ ;

G, roue engrenant avec l'anneau E et tournant quatre fois plus vite ;

S, roue de même diamètre que E et dont l'axe prolongé porte l'aiguille du cadran D (*fig.* 6) ;

T, T, bouton pour remonter les ressorts par encliquetage ;

U, carré de mise à l'heure des aiguilles d'heures et de minutes ;

L, levier conducteur du pendule, dont l'axe passe au centre de la glace X;

N, tige qui fait un mouvement vertical à chaque seconde et laisse échapper le fouet F du rouage antérieur à la boîte;

F, levier ou fouet, dont le tour représente une seconde sur les cadrans placés au devant de la boîte.

En tournant la manivelle par le carré R, tout le mouvement tourne et conduit la roue S, dont le déplacement est indiqué par l'aiguille fixée sur son axe. On détermine ainsi, en tournant à droite ou à gauche, l'avance ou le retard des aiguilles de la pendule.

La tige N fait, à chaque seconde, un mouvement de bas en haut, qui est produit par le rouage de la seconde indépendante et ne trouble en rien la marche du pendule. Cette tige doit être placée parfaitement au centre du mouvement.

Les choses étant ainsi disposées, il est évident que, si l'on fait tourner, dans un sens ou dans l'autre, le mouvement horizontal, le mouvement vertical, dont le fouet F fait partie, le suit exactement et traduit tous les effets résultant de la marche circulaire des platines horizontales.

Quant aux rouages, indiqués sur la figure, ce sont des rouages de pendule ordinaire, complétés par l'addition de deux mobiles. *d* étant l'axe des secondes, les nombres de dents des roues *e*, *f*, *g*, *h* doivent être déterminés de manière à ce que le fouet F fasse 60 tours pour un de l'axe *d*.

La disposition des renvois électriques ne présente rien de particulier.

Vérification de la concentricité des oscillations. — Le pendule conique, employé dans l'appareil précédent, doit, autant que possible, décrire un cercle parfait et exactement concentrique. Si, au lieu d'un cercle, on avait une ellipse, les angles décrits, dans des temps égaux, par le levier conducteur seraient différents et l'aiguille des secondes aurait un mouvement saccadé, très-visible à l'œil.

On peut vérifier si la concentricité existe réellement au moyen du *comparateur chronométrique* de M. Redier. Après avoir réglé ce comparateur, le mieux possible, avec la pendule qu'on veut vérifier, on établira la coïncidence entre les deux instruments, puis, en détruisant d'un certain nombre de dixièmes de seconde cette coïncidence dans l'un d'eux, on s'assurera qu'en faisant le même changement dans l'autre, la coïncidence se retrouve. Si elle persiste à tous les points du cercle des aiguilles indicatrices du déplacement des mouvements, on devra en conclure que la concentricité est parfaite.

Seconde pendule de M. Redier. — Dans l'appareil précédent, le déplacement du mouvement moteur du pendule oblige à recourir à l'emploi d'un mécanisme spécial, pour transmettre l'heure d'une manière lisible.

M. Redier a imaginé un autre dispositif, qui permet d'éviter l'emploi de ce troisième rouage, mais qui, par contre, a l'inconvénient de surcharger un peu les derniers mobiles du mouvement principal.

Pour la description de cette seconde pendule et du comparateur chronométrique, nous renverrons au mémoire publié par l'auteur.

Influence du mouvement de rotation de la terre sur le mouvement du pendule conique. — Le plan d'oscillation d'un pendule ordinaire conserve une direction parfaitement invariable dans l'espace, quel que soit le genre de déplacement qu'on fasse subir au point d'attache de la suspension. C'est sur ce principe que repose la célèbre expérience de Foucault, au moyen de laquelle il a démontré si simplement le mouvement de rotation de la terre.

Une propriété analogue existe pour le pendule conique. M. Bravais a démontré, par des expériences qu'il a soumises à l'Académie des Sciences, que si deux pendules coniques, exactement de même longueur, oscillent, en tournant, l'un à droite et l'autre à gauche, ils ne marchent pas avec la même vitesse, de telle sorte que le mouvement de rotation de la terre semble s'ajouter au mouvement du pendule ou s'en retrancher.

Pour rendre cet effet plus facile à comprendre, supposons qu'on se transporte au pôle nord. Pour un spectateur, placé dans la direction de l'axe de la terre et qui serait complétement immobile, la terre tournerait de droite à gauche. Si un pendule conique à secondes était en marche à ce point du globe, en tournant dans le même sens, il semblerait faire un tour de moins en 24 heures, tandis qu'un autre pendule identique, oscillant dans le sens contraire, semblerait faire un tour de plus, de telle sorte que ces deux pendules différeraient de deux secondes en 24 heures.

Un effet du même genre se produit, et d'une manière beaucoup plus sensible, lorsqu'un pendule conique fait partie d'un appareil susceptible de tourner sur lui-même. C'est ce que M. Redier a démontré très-simplement, au moyen d'une petite horloge à pendule conique, installée sur un plateau tournant, bien horizontal et bien concentrique au pendule.

Si l'on met cette horloge en marche et qu'on compare exactement son heure avec celle d'un chronomètre, on remarque qu'en faisant faire un tour au plateau, dans le sens du mouvement du pendule, l'aiguille des secondes offre un retard d'une seconde, tandis qu'elle se trouve en avance de la même quantité, lorsque le tour du plateau s'est effectué en sens contraire.

Pour un demi-tour, la différence ne serait que d'une demi-seconde; d'une manière générale, les avances ou les retards sont toujours rigoureusement proportionnels au déplacement angulaire du plateau.

Le principe de la conservation du plan d'oscillation se trouve ainsi nettement démontré. L'application de ce principe semble fournir une solution

très-simple du problème de l'avance ou du retard dans le pendule conique. Mais il importe de remarquer que ce principe, bien que très-rigoureux, se prête assez difficilement à l'exécution, surtout pour de longs pendules. Le mécanisme de M. Redier, que nous avons indiqué précédemment, peut être rapidement conduit, sans inconvénient, tandis qu'on serait exposé à altérer la marche du pendule par les trépidations qui pourraient se produire, dans un déplacement brusque de l'ensemble de l'horloge.

Observations finales sur la suspension. — Nous terminerons ce qui est relatif au pendule conique par quelques observations de M. Redier sur le mode d'action de la suspension à lames à la Cardan, qui lui paraît devoir être employée de préférence à toutes les autres. Avec la suspension à quatre lames à la Cardan, attachée à un axe vertical, qu'on peut faire tourner à droite ou à gauche indéfiniment, il est facile de faire décrire au pendule des oscillations planes, elliptiques ou circulaires.

Pour ces trois sortes de mouvements, quelle que soit la vitesse qu'on imprime à l'ensemble du pendule, en le faisant tourner par le bouton qui le surmonte, sa marche n'est altérée en aucune manière.

Les oscillations planes conservent leur plan exactement, le grand axe de l'ellipse conserve toujours la même direction, et enfin la circonférence du cercle est rigoureusement décrite avec la même vitesse.

Dans les expériences de ce genre, on voit le point de flexion des lames se déplacer successivement, à mesure qu'on tourne l'ensemble du pendule, mais il ne se manifeste aucune torsion. Les lames au repos deviennent lames fléchissantes et réciproquement, ou bien elles participent toutes ensemble à l'oscillation.

BALANCIER ANNULAIRE.

Généralités. — Dans toutes les pièces portatives, destinées à la mesure du temps, le *régulateur* de la marche est, comme on le sait, un *balancier*, dont le mouvement circulaire alternatif est produit par un ressort, contourné généralement en spirale ou en hélice, autour de l'axe du balancier, et qui porte le nom de *spiral réglant*. L'élasticité de ce ressort joue, au point de vue des vibrations du balancier, un rôle analogue à celui de la pesanteur relativement aux oscillations du pendule. Ainsi, à chaque vibration, le spiral ramène le balancier en un certain point mort, qu'on appelle le zéro de tension, parce qu'en ce point le ressort n'exerce plus aucune action; il en est de même de l'action de la pesanteur, lorsque le pendule se trouve sur la verticale du point de suspension.

Lorsque le balancier est arrivé au zéro de tension du ressort, il possède

une certaine quantité de force vive (*), qu'il a acquise en effectuant sa demi-vibration et en vertu de laquelle il continue son mouvement circulaire. Cette force vive est employée à bander le spiral et, lorsqu'elle est dépensée, la vibration est complète. Sous l'action du spiral, le balancier revient alors sur ses pas, arrive au point mort, le dépasse et ainsi de suite.

De même que pour le pendule, la grandeur des arcs parcourus irait constamment en décroissant, jusqu'au repos absolu, si la force motrice ne venait restituer périodiquement au balancier la quantité de force vive qu'il perd à chaque oscillation. La force motrice, qui réside dans un ressort, présente nécessairement des inégalités de tension. Dans les chrono-

---

(*) La *force vive* d'un point matériel, de masse m, animé d'une vitesse v, est égale à mv^2. Pour un ensemble de points matériels m, m', m'', animés de vitesses v, v', v''..., elle est représentée par la somme $mv^2 + m'v'^2 + m''v''^2 + \ldots$, qu'on peut écrire plus simplement Σmv^2. Pour un corps de masse M, dont tous les points auraient la même vitesse V, la force vive serait MV^2. Si l'on suppose que ce corps passe d'une vitesse V_0 à une vitesse V, l'accroissement de force vive qu'il éprouve sera représenté par $MV^2 - MV_0^2$. — On démontre, en mécanique, que cet accroissement de force vive est précisément le double du travail des forces qui ont produit ce changement de vitesse. En désignant ce travail par T_m, on a donc :

$$T_m = \frac{1}{2} MV^2 - \frac{1}{2} MV_0^2.$$

Ce travail est positif, si V est plus grand que V_0, c'est-à-dire si la vitesse du corps a augmenté, et négatif si, au contraire, V est plus petit que V_0. Dans ce cas, au lieu d'un accroissement, on a une diminution de force vive.

Si l'on considère, par exemple, un pendule de poids P et si l'on désigne par H la hauteur dont est descendu le centre de gravité, depuis le commencement d'une oscillation jusqu'à la verticale, le travail de la pesanteur est positif et représenté par PH; comme, d'ailleurs, la vitesse V_0 à l'origine est nulle, l'accroissement de force vive est simplement MV^2, et l'on a, par suite :

$$PH = \frac{1}{2} MV^2,$$

ou, comme $M = \frac{P}{g}$,

$$H = \frac{V^2}{2g}.$$

Expression qui donne la vitesse théorique que possède le pendule, lorsqu'il arrive sur la verticale.

Si, au contraire, on considère la demi-oscillation suivante, le travail de la pesanteur devient négatif, et il est représenté par — PH. La vitesse initiale est V et la vitesse finale V_1; on a donc encore :

$$-PH = \frac{1}{2} MV_1^2 - \frac{1}{2} MV^2.$$

Comme $V_1 = 0$, cette relation devient :

$$PH = \frac{1}{2} MV^2.$$

Dans la première moitié de l'oscillation, la pesanteur agit pour augmenter la vitesse et son travail se transforme en puissance vive. Dans l'autre moitié, la puissance vive est détruite par le travail résistant de la pesanteur.

Avec le spiral, l'expression du travail absorbé pour le bander est plus compliquée, mais la relation précédente subsiste.

Il faut bien se garder de confondre, comme on le fait souvent, la force vive d'un corps et sa quantité de mouvement, laquelle est représentée simplement par MV.

mètres, l'emploi d'une fusée a pour but de rendre constant le moment de la tension du ressort, dans ses divers tours d'armure, de sorte que la force motrice d'un chronomètre pourrait être considérée comme sensiblement uniforme, si la fusée était parfaitement égalisée et si les divers frottements conservaient toujours la même valeur. En réalité, il ne peut en être rigoureusement ainsi. Dans les montres, où la fusée a été supprimée, les variations de la force motrice sont beaucoup plus considérables. Il en résulte, pour la grandeur des arcs du balancier, des variations qui sont de nature à altérer la durée des oscillations.

Nous avons dit que, pour le pendule, on arrivait à annuler sensiblement cette cause de perturbation en ne lui faisant décrire que de très-petits arcs. Mais ce correctif ne peut être appliqué aux balanciers, pour lesquels une longue expérience a démontré que les très-grands arcs étaient bien préférables aux petits, et il est nécessaire de réaliser l'isochronisme d'une autre manière.

En 1766, Pierre Leroy a été conduit par l'observation à établir ce principe que, *dans tout spiral suffisamment long, il existe une certaine longueur pour laquelle les oscillations grandes et petites sont isochrones.*

D'après P. Leroy, cette longueur devait, dans chaque cas, être déterminée par tâtonnements. Plus tard, Berthoud a donné, sur ce sujet, quelques règles empiriques, spécialement applicables aux pièces de sa propre fabrication.

Mais ce n'est qu'en 1861 que la théorie analytique du spiral a été établie par un savant ingénieur des mines, M. Phillips, qui a pu déterminer les conditions que doit remplir cet organe, pour réaliser l'isochronisme des vibrations. Ce remarquable travail a été inséré dans le XIXe volume des *Annales des Mines.* Les calculs assez compliqués, qui sont reproduits dans ce mémoire, ne sont pas à la portée de tous les praticiens. Mais les principaux résultats, auxquels est arrivé cet ingénieur, ont été exposés par lui dans une espèce de manuel pratique, que nous reproduisons intégralement à la suite de cet article. Afin d'éviter des répétitions inutiles, nous croyons devoir renvoyer à ce manuel pour les définitions des quantités, dont nous aurons à faire usage, telles que le moment d'inertie, le moment d'élasticité, etc., et nous supposerons connus dès maintenant les résultats que M. Phillips a déduits du calcul.

Relations entre les dimensions du balancier, sa masse et l'énergie du spiral. — Pour régler un chronomètre, dont le rouage est construit, il faut faire exécuter au balancier un nombre déterminé N de vibrations, par seconde, de telle sorte qu'on ait :

$$NT = 1,$$

ce qui exige une certaine relation entre les dimensions du balancier, sa masse et l'énergie du spiral.

Si l'on désigne par A le moment d'inertie du balancier, par L la longueur du spiral et par M son moment d'élasticité, qui dépend de la forme de sa section et du coefficient d'élasticité de la matière dont il est composé, la durée des vibrations, pour un spiral isochrone, est, d'après M. Philipps :

$$T = \pi \sqrt{\frac{AL}{M}}.$$

P étant le poids du balancier, r le rayon moyen de son anneau et g l'accélération de la pesanteur, on peut prendre, pour le moment d'inertie du balancier, celui de l'anneau, en négligeant celui des bras, dont la masse est très-faible comparativement à celle de cet anneau. Ce moment d'inertie a pour expression :

$$A = \frac{P}{g} r^2.$$

On a donc :

$$T^2 = \pi^2 \frac{P}{g} r^2 \times \frac{L}{M} = \frac{1}{N^2}.$$

ou, en remplaçant π et g par leurs valeurs :

$$\frac{Pr^2L}{M} = \frac{g}{\pi^2 N^2} = \frac{1,0063}{N^2}.$$

Cette formule suppose qu'on a pris le kilogramme pour unité de force et le mètre pour unité de longueur. Mais, en raison de la petitesse et de la légèreté des organes de chronomètres, il est plus commode de prendre, pour ces deux unités, le gramme et le millimètre, et la formule devient alors :

$$\frac{Pr^2L}{M} = \frac{1006,8}{N^2}.$$

Cette relation montre que le poids du balancier peut être d'autant plus faible que le rayon de l'anneau est plus considérable. Toutefois, il convient de ne pas trop réduire ce poids, car l'influence de certaines résistances passives, telles que celles de l'air, augmente avec la vitesse. Dans les montres ordinaires, on prend souvent le diamètre de l'anneau égal à celui du barillet ; il ne reste plus alors, comme indéterminées dans la formule précédente, que P, L et M. Le réglage s'obtient en essayant plusieurs spiraux, plus ou moins longs, jusqu'au moment où l'on est arrivé au résultat voulu, ce qui revient, en définitive, à trouver, par des tâtonnements pratiques, la valeur du rapport $\frac{L}{M}$ de la formule.

Nécessité de la compensation. — La formule de M. Phillips :

$$T = \pi \sqrt{A \frac{L}{M}}$$

montre que la durée de la vibration est indépendante de l'amplitude; mais, pour que cette durée soit constante, il est indispensable que les trois quantités sous le radical, A, L et M, soient invariables, ou que, du moins, par un système de compensations réciproques, elles conservent une valeur constante au radical.

Le moment d'inertie A du balancier est, comme nous l'avons dit, le produit de la masse de l'anneau (ou de la serge) par le carré du rayon moyen. Comme ce rayon varie nécessairement avec la température, il est nécessaire de compenser le balancier; cette compensation, comme nous le verrons, présente de sérieuses difficultés pratiques et ne peut jamais être réalisée d'une manière absolue.

La longueur développée du spiral L est également variable avec la température.

Enfin le moment d'élasticité M, qui dépend de la forme et des dimensions de la section du spiral, ainsi que de l'état moléculaire de la matière, se trouve aussi soumis à l'influence des variations de la température.

L'invariabilité de chacune des quantités A, L, M, prise séparément, ne saurait donc exister pour des appareils soumis aux conditions essentiellement variables de la température; dès lors, on a dû chercher, dans la compensation réciproque de ces éléments, la solution du problème de l'isochronisme.

En réalité, ce n'est que pour les chronomètres de marine et les montres de prix qu'on a recours à la compensation. Pour les montres ordinaires, il suffit de maintenir les écarts de la durée des vibrations entre des limites suffisamment restreintes.

BALANCIERS COMPENSATEURS.

Généralités. — Le système du balancier compensateur circulaire a été décrit par Moinet (page 419, t. II). Sa construction est très-simple et présente une très-grande symétrie. Mais son efficacité laisse à désirer; avec ce balancier, la marche d'un chronomètre, parfaitement réglée aux températures moyennes, n'est plus la même aux températures extrêmes. Cet effet doit être attribué, tantôt à une insuffisance, tantôt à un excès de compensation, suivant la position des masses réglantes.

Pour corriger l'insuffisance de la compensation, on a proposé des dispositifs de compensation auxiliaire, dont l'action n'intervient que lorsque l'effet principal devient nul. Pour atténuer, au contraire, l'excès de compensation, on a eu recours à des modérateurs, qui, en déplaçant les centres de mouvement des lames bi-métalliques, ont pour effet de renfermer leurs excursions entre certaines limites.

Ces accessoires ont naturellement pour conséquence de compliquer le balancier et, s'ils ne sont pas parfaits, ils peuvent offrir l'inconvénient d'a-

jouter leurs erreurs propres à celles de ce balancier. On comprend, d'ailleurs, que la complication des organes et la multiplicité des effets doivent augmenter les difficultés, déjà si grandes, du travail et de l'équilibre du balancier et qu'elles exigent impérieusement une exécution irréprochable et des métaux d'une pureté et d'une homogénéité exceptionnelles.

Malgré ces difficultés, on a vu se produire, dans les trente dernières années, un grand nombre de dispositifs de balanciers à compensation auxiliaire, dont quelques-uns sont très-ingénieux. Nous nous bornerons à faire connaître ceux dont l'efficacité paraît avoir été consacrée par l'expérience.

Balanciers Jacob. — Cet horloger est l'inventeur de deux dispositions différentes de balanciers compensateurs.

Dans la première, représentée *fig.* 1 (Pl. IX), les variations, aux températures extrêmes inférieures, se trouvent corrigées par le déplacement des centres de mouvement des lames bi-métalliques. A cet effet, sur l'axe du balancier est montée une barrette mobile BB, dont les extrémités sont recourbées à angle droit et portent deux vis *V*, *V*, contre lesquelles viennent buter les arcs bi-métalliques, lors des abaissements de température. Comme la position de ces vis peut être variée à volonté, en déplaçant la barrette, on conçoit qu'il soit possible d'arriver à changer le centre de mouvement des arcs, de manière à limiter convenablement l'écart des masses réglantes à la température extrême inférieure qu'on s'est fixée et, par suite, à empêcher l'excès de compensation qui pourrait se produire à cette température.

Dans la seconde disposition de M. Jacob, représentée *fig.* 2 (Pl. IX), les irrégularités de la compensation sont corrigées par un compensateur auxiliaire, formé d'un petit balancier, concentrique au balancier principal et dont les lames bi-métalliques sont limitées, dans leurs mouvements, par deux vis d'arrêt V et V', disposées sur la grande barrette. En déplaçant graduellement ces vis et en faisant tourner, dans son plan, le petit balancier, on pourra arriver à une position telle que son action sera nulle au-dessous d'une certaine température, tandis qu'elle deviendra efficace à des températures supérieures, pour lesquelles commence à se produire l'insuffisance de la compensation principale.

Balancier Rodanet. — Ce balancier, qui est représenté *fig.* 3 (Pl. IX), est disposé de manière à ce que les déplacements des masses réglantes s'effectuent rigoureusement suivant des lignes droites, passant par le centre du balancier.

En 1855, M. Rodanet, à l'aide d'un appareil fort ingénieux, avait constaté que, dans le balancier circulaire, à lames bi-métalliques, le mouvement des masses réglantes avait lieu suivant des droites qui ne passaient pas par le centre; il avait, en outre, reconnu que les déplace-

ments des masses sur ces droites étaient sensiblement proportionnels aux variations de la température. Par là s'expliquaient les retards observés aux limites extrêmes de température, lorsque le réglage a été réalisé pour une température moyenne.

Pour faire disparaître ces retards, il paraissait, dès lors, naturel de modifier la forme circulaire des arcs, de telle sorte que les déplacements se fissent suivant des rayons du balancier. C'est ainsi que M. Rodanet a été conduit à la disposition de la *fig.* 3 qui satisfait à cette condition.

Balancier Hohwü. — Dans le balancier Hohwü (*fig.* 4, Pl. IX), les défauts de compensation, aux températures extrêmes, sont corrigés par un compensateur auxiliaire, superposé au compensateur principal et formé de lames également bi-métalliques, mais beaucoup plus minces.

Cette compensation additionnelle, adaptée à des chronomètres qui ont onctionné, près de trente ans, sous diverses latitudes, a donné des résultats tels qu'il n'est plus permis de douter de son efficacité. Nous donnons ici, comme exemple, les résultats de marche d'un chronomètre, avant et après l'addition de ce dispositif.

MARCHE DU CHRONOMÈTRE			
avec compensation ordinaire.		avec compensation auxiliaire.	
+ 5°,55 (centigrades)	— 3^s,1	1°,11	— 6^s,61
15°,5 à 17°,8	— 5^s,6	17°,77	— 6^s,30
30°	— 3^s,0	32°,22	— 6^s,53

Balancier Dent. — Dans ce balancier (*fig.* 5, Pl. IX), qui est remarquable par la simplicité de sa construction, l'excès de compensation, aux températures inférieures, est modéré par l'action de deux ressorts rectilignes *r*, *r'*. Ces ressorts agissent sur des goupilles, implantées aux extrémités des arcs bi-métalliques, pour empêcher la trop grande extension de ces arcs, de manière à rendre constant le moment d'inertie du balancier, qui tend à augmenter aux basses températures.

Les ressorts sont fixés à une barrette additionnelle *bb*, vissée sur la barrette principale, de façon à donner à ces ressorts une grande élasticité et surtout une longueur suffisante, afin de diminuer l'influence de leur frottement sur les goupilles. On peut, d'ailleurs, faire varier la tension des ressorts, en tournant les têtes de vis excentriques *v*, *v*, qui agissent sur un bras de levier faisant corps avec chaque ressort.

Balancier John Poole. — Dans ce balancier (*fig.* 6, Pl. IX), les erreurs de compensation, comme dans le balancier Jacob, sont corrigées par le déplacement des centres de mouvement des arcs bi-métalliques. Cet effet

est produit par des vis V, V′, qu'on déplace sur une pièce fixe, disposée concentriquement aux arcs et à l'extérieur.

Cette disposition paraît, d'ailleurs, imitée de celle qui a été exécutée jadis par un habile artiste français, M. Winnerl. La seule différence consiste en ce que les pièces additionnelles, au lieu d'être rigides, comme dans le balancier précédent, sont amincies sur une partie de leur longueur, afin d'offrir une certaine élasticité.

Balancier Vissière. — Ce balancier, qui porte des masses compensatrices à lames bi-métalliques, est représenté *fig.* 7 (Pl. IX).

B est un balancier compensateur ordinaire, sur la lame duquel est fixée, au moyen d'une vis V, une pièce entaillée *a*; *bcd* est une lame bi-métallique circulaire, munie d'un bras *e* et coupée en *f*; elle est fixée sur la pièce *a*, au moyen de la vis *g*, qui est creuse et taraudée à l'intérieur, pour recevoir une autre vis *h*, qui sert à équilibrer le système.

Sur la lame *bcd*, près de la coupure, est placée une masse *m*, qui est fixée par la vis *k*, et dont le poids peut être modifié au moyen d'une vis centrale *l*; *n* est une masse auxiliaire, placée sur l'arc du balancier principal et dont le poids, mis en rapport avec la masse *m*, sert à déterminer l'intensité de l'action de compensation.

Les effets de cette compensation sont très-nettement indiqués dans une note de M. Vissière, que nous reproduisons intégralement :

« Une compensation additionnelle doit non-seulement donner une marche égale aux extrêmes et moyennes températures, mais elle doit aussi conserver l'uniformité de la marche, en passant par toutes les températures intermédiaires, et pouvoir atteindre des limites plus étendues que celles de 0° à 30°, où l'on s'arrête ordinairement.

« La masse *m*, à lame bi-métallique *bcd*, a cette propriété; cette lame est composée d'acier à l'intérieur et de laiton à l'extérieur.

« Cette masse *m* est placée sur le prolongement d'un rayon du balancier, passant par le centre de la lame *bcd*, à la température +15°. Si cette température s'élève ou s'abaisse, la masse *m* passe, par l'effet de la dilatation de la lame *bcd*, d'un côté ou de l'autre du rayon, en suivant la circonférence de la lame; mais, comme cette circonférence n'est pas concentrique au balancier, il en résulte que la masse *m* se rapproche du centre (à droite comme à gauche du rayon) et tend à accélérer la marche du balancier. Cette accélération sera d'autant plus grande que la masse s'éloignera davantage de sa position normale.

« On peut obtenir une compensation dans les limites de *une seconde* par des changements de température de 50°.

« Je n'ai encore expérimenté que jusque-là, mais j'ai lieu de croire qu'on peut aller plus loin. »

Construction des lames bi-métalliques. — Dans les balanciers composés, du genre de ceux que nous venons de décrire, les lames bi-métalliques sont formées d'acier et de laiton; ce dernier métal a généralement une épaisseur double de celle de l'acier, lorsque le balancier est complétement terminé; toutefois, dans quelques appareils, l'épaisseur de ce dernier métal est égale aux $\frac{2}{5}$ de l'épaisseur totale de la lame.

Le laiton est ordinairement soudé à l'acier, par fusion, à une haute température, de telle sorte que les deux métaux, lorsqu'ils sont revenus à la température ordinaire, se trouvent dans des conditions anormales; de là des perturbations, d'une espèce particulière, qui permettent de supposer qu'il se fait ultérieurement un travail moléculaire, plus ou moins prolongé, et de nature à modifier, à la longue, la compensation réalisée à l'époque de la construction.

Pour se mettre à l'abri de cette cause d'altération, on a eu l'idée d'opérer la soudure des lames à la température ordinaire, en déposant, sur la lame d'acier, une couche de cuivre ou d'argent par voie électro-chimique.

En 1867, un habile artiste français, M. Lecoq, a exposé des balanciers, composés d'une lame d'acier qui était recouverte d'une couche d'argent, déposée par la pile et dans lesquels la compensation s'opérait d'une manière très-régulière.

MODE DE RÉCEPTION DES CHRONOMÈTRES POUR LE SERVICE DE LA MARINE.

En France, les chronomètres, présentés pour le service de la marine de l'État, sont soumis au dépôt, pendant trois mois, à une série d'épreuves faites à la température ambiante et à des températures artificielles de 5 à 30°.

La moyenne des marches est établie sur des séries de cinq jours.

Pour qu'un chronomètre soit déclaré admissible, il faut que, pendant ces trois mois, le plus grand écart des marches à la température ambiante, ajouté au plus grand écart des marches aux températures artificielles, ne dépasse pas *trois secondes*.

RECHERCHES SUR LES CAUSES DE VARIATIONS DES CHRONOMÈTRES.

En étudiant avec soin les causes de variation des appareils chronométriques, M. Lieussou, ingénieur hydrographe, est arrivé à cette conclusion que la marche d'un chronomètre varie à la fois avec l'âge des huiles et avec la température.

En désignant par x le temps écoulé, t la température du lieu, T, a, b, c

des coefficients, il a trouvé que la marche m d'un chronomètre, en fonction du temps et de la température, pouvait être représentée par l'équation générale :

$$m = a + bx - c(T - t)^2.$$

Dans cette équation, les quatre coefficients a, b, c et T sont des valeurs particulières à chaque chronomètre, qui constituent son régime spécial et doivent être déterminées, au moyen de quatre marches quelconques, observées à des températures et à des époques différentes.

La constante T est la température à laquelle le chronomètre prend sa marche maxima; elle est la moyenne des deux températures, pour lesquelles le constructeur a établi l'égalité de marche. Pour un chronomètre bien réglé, cette constante doit être comprise entre 15 et 20°.

Le coefficient c est la diminution de marche diurne, pour un changement de température de 1°, en plus ou en moins, à partir de T°. Il est la mesure de l'imperfection de la compensation et se conserve invariable tant que le spiral et le balancier ne sont pas modifiés. Pour un bon chronomètre, ce coefficient ne doit pas dépasser $0^s,02$.

Le coefficient b est le changement de marche du chronomètre dans l'unité de temps. Il peut être considéré comme sensiblement constant pour un an (temps supérieur à la durée des plus longues traversées). C'est, en quelque sorte, la mesure du défaut d'isochronisme entre les grandes et les petites oscillations du balancier. Pour les chronomètres bien établis, il ne doit pas dépasser $0^s,01$ par jour.

La constante a est la marche initiale du chronomètre à T°. Elle est la mesure de l'imperfection du réglage de la montre sur le temps moyen à T°. Cette marche initiale augmente ou diminue d'une quantité bx, proportionnelle au nombre de jours x. La marche initiale est généralement établie en retard de quelques secondes sur le temps moyen, de manière à ce qu'en trois ans elle s'en écarte le moins possible. En faisant, par exemple, $a = -5^s$ au moment initial, elle sera $-5^s + 548\,b$ ou 0 après 18 mois et $-5^s + 1.096\,b$ ou $+5^s$ au bout de 3 ans.

Dans la détermination de ces divers coefficients, on obtiendra d'autant plus de précision que les intervalles des observations seront plus grands et les écarts de températures plus considérables.

DU SPIRAL RÉGLANT (*)

Notions préliminaires. — L'exposé des principaux résultats fournis par la théorie du spiral réglant exige quelques explications préliminaires sur certaines quantités, qui entrent dans ces résultats, et qu'il est indispensable de faire connaître à ceux des lecteurs auxquels la science de la mécanique pourrait n'être pas familière.

Moment d'inertie. — Le moment d'inertie d'un corps, assujetti à tourner autour d'un axe fixe, est, à proprement parler, le résultat que l'on obtiendrait, en multipliant le poids de chacune des parties infiniment petites qui le composent par le carré de la distance correspondante de cette même partie à l'axe, ajoutant tous ces produits et divisant le tout par le nombre 9.80896. Il existe des formules, en général fort simples, pour calculer, d'un seul coup, ce résultat définitif, dans les différents cas qui peuvent se présenter. Disons tout de suite que, pour un balancier, par exemple, si la matière qui le compose est presque entièrement répartie sur sa circonférence, on aura d'une manière très-approchée :

$$A = \frac{P \times r^2}{g}. \tag{1}$$

Dans cette formule, A est le moment d'inertie ;
P, le poids du balancier ;
r, son rayon ;
g, ou la gravité, doit être remplacé par le nombre 9.80896.

Ainsi il suffira de multiplier le poids du balancier par le carré de son rayon et de diviser le produit par 9.80896 ; le résultat sera très-approximativement la valeur de A, c'est-à-dire du moment d'inertie.

Seulement, il faut faire attention que P doit être évalué par rapport au kilogramme pris pour unité, et r par rapport au mètre pris pour unité.

Ainsi, supposons qu'un balancier, ayant sa matière presque entièrement rassemblée sur sa circonférence, pèse 7 grammes et ait un diamètre de 20 millimètres. On aurait :

$$A = \frac{0.007 \times (0.01)^2}{9.80896},$$

ou environ :

$$A = 0,0000000714.$$

(*) Cet article est la reproduction intégrale du *Manuel pratique sur le spiral réglant des chronomètres et des montres* de M. Phillips. Ce manuel est un exposé succint des principaux faits auxquels est parvenu ce savant ingénieur dans le mémoire qu'il a présenté à l'Académie des Sciences en 1860, et qui a été inséré dans le *Recueil des savants étrangers*, dans le *Journal des Mathématiques* de M. Liouville et dans les *Annales des mines* (t. XIX, 1861).

Moment d'élasticité. — On appelle ainsi, dans la théorie de la résistance des corps solides, une quantité qui s'applique spécialement aux substances allongées, qui ont une section transversale uniforme, comme, par exemple, un fil de spiral, dont la section transversale est la même en tous les points. Ce moment d'élasticité se mesure en faisant le produit de deux quantités. La première est ce qu'on nomme le coefficient d'élasticité : on le désigne ordinairement par la lettre E. Sa valeur dépend uniquement de la substance qui forme le fil : si c'est de l'acier ou du fer, on peut prendre approximativement,

$$E = 20,000,000,000.$$

Si le spiral était fait d'une autre substance, il faudrait prendre pour E le nombre correspondant à ce métal et que l'on trouve dans des tables publiées dans les recueils, qui traitent de la résistance des matériaux.

La seconde quantité, par laquelle il faut multiplier le coefficient d'élasticité, pour obtenir le moment d'élasticité, dépend seulement de la forme de la section transversale du fil. Les ouvrages qui traitent de la résistance des matériaux permettent d'obtenir, dans tous les cas, la valeur de cette quantité. Mais voici quelques exemples :

Si la section est un cercle, la valeur en question est $\frac{\pi r^4}{4}$, r étant le rayon, et, comme π est égal à 3.1416, il faudra faire la quatrième puissance du rayon, puis la multiplier par 3.1416 et diviser par 4. Alors, si l'on appelle M le moment d'élasticité, on a :

$$M = E \times \frac{\pi r^4}{4}. \tag{2}$$

Si la section est un rectangle dont la largeur soit a et l'épaisseur e, on a

$$M = E \times \frac{ae^3}{12}. \tag{3}$$

Daus ce cas, il faut multiplier la largeur du fil par le cube de son épaisseur, diviser par 12 et multiplier le résultat par le coefficient d'élasticité. Il faut encore avoir soin que la largeur et l'épaisseur du fil ou, quand il est rond, son rayon, doivent être évalués par rapport au mètre, comme unité de longueur. Il est essentiel aussi de faire attention que, quand la section du fil est un rectangle et qu'il s'agit d'un spiral, il faut prendre, pour la largeur a, le côté du rectangle qui est parallèle à l'axe de rotation, et, pour l'épaisseur e, le côté de ce même rectangle qui est perpendiculaire à cet axe.

Ainsi, s'il s'agissait d'un spiral d'acier à section rectangulaire, ayant

$\frac{1}{2}$ millimètre de largeur et $\frac{1}{5}$ de millimètre d'épaisseur, on aurait, pour le moment d'élasticité,

$$M = 20000000000 \times \frac{0.0005(0.0002)^3}{12}$$

ou

$$M = 0.0000003333.$$

La section transversale d'un spiral n'est pas ordinairement parfaitement rectangulaire; mais, en général, elle s'en éloigne peu. Du reste on sait, dans tous les cas, calculer rigoureusement le moment d'élasticité d'une section de figure quelconque.

De plus, j'ai indiqué, dans mon mémoire antérieur, un moyen expérimental et très-simple de déterminer, d'un seul coup, le moment d'élasticité d'un spiral, quand on possède un bout rectiligne du même fil.

Ces préliminaires posés, je vais passer successivement en revue les principaux résultats auxquels je suis parvenu. J'observerai de suite que ceux-ci ont toujours présenté, avec des expériences faites dans les circonstances les plus diverses, un accord aussi parfait qu'il était permis de le désirer; et ceci devait être, car il est bon d'observer que la théorie dont ils proviennent ne suppose aucune idée préconçue, aucune hypothèse gratuite, mais qu'elle émane directement de la théorie même de l'élasticité.

De la durée des vibrations d'un balancier mû par un spiral. — Une première loi très-essentielle est celle qui fait connaître la durée des vibrations d'un balancier, mû par un spiral donné isochrone. La formule à laquelle je suis arrivé est la suivante :

$$T = \pi \sqrt{\frac{AL}{M}}. \tag{4}$$

T est la durée d'une vibration simple du balancier, rapportée à la seconde comme unité;

A est le moment d'inertie du balancier;

M, le moment d'élasticité du spiral;

L, la longueur du spiral, supposé rectifié, rapportée au mètre comme unité de longueur;

π, le rapport de la circonférence au diamètre, c'est-à-dire le nombre 3.1415926.

De là résulte la règle suivante :

Pour avoir la durée d'une oscillation simple d'un balancier, mû par un spiral donné, il faut multiplier le moment d'inertie du balancier par la longueur développée du spiral, diviser le produit par le moment d'élasticité de ce spiral, extraire la racine carrée du résultat et multiplier cette

racine carrée par 3.1415926. Le nombre ainsi obtenu est la durée d'une vibration simple du balancier, rapportée à la seconde comme unité de temps.

Ces calculs ne sont pas longs, mais on les abrége encore en faisant usage des logarithmes. Par exemple, pour un certain système d'un balancier et d'un spiral, supposons qu'on ait :

$$A = 0.0000001284971$$
$$L = 0^{m}.31895$$
$$M = 0.0000006546.$$

On posera :

$$\log. A = \bar{7}.1088933$$
$$\log. L = \bar{1}.5037226$$

d'où

$$\log. (AL) = \bar{8}.6126159$$
$$\log M = \bar{6}.8159760$$

d'où

$$\log. \left(\frac{AL}{M}\right) = \bar{3}.7966399$$

et

$$\log. \sqrt{\frac{AL}{M}} = \frac{1}{2} \log. \left(\frac{AL}{M}\right) = \bar{2}.8983199$$

puis

$$\log. \pi = 0.4971499$$

donc

$$\log T = \bar{1}.3954698$$

et

$$T = 0''.24858$$

Loi de la proportionnalité de la durée des vibrations avec la racine carrée de la longueur du spiral. — On tire comme conséquence de la formule (4), qui donne la durée des vibrations, une loi très-essentielle et tout à fait analogue à celle qui régit les oscillations du pendule. Elle consiste en ce que, toutes choses égales d'ailleurs, c'est-à-dire le balancier restant le même et le spiral ne variant que par sa longueur, la durée des vibrations change précisément dans le rapport de la racine carrée de la longueur développée du spiral. Ainsi, de même que la durée des oscillations du pendule varie proportionnellement à la racine carrée de sa longueur, de même si la longueur seule d'un spiral vient à changer, mais que sa substance et sa section transversale restent les mêmes, ainsi que le balancier, la durée des vibrations du balancier variera aussi proportionnellement à la racine carrée de la longueur développée du ressort spiral. Ce rapprochement est d'autant plus curieux qu'il n'y a aucune espèce d'analogie entre le pendule et le spiral, tant sous le rapport du corps en mouvement que du moteur.

C'est d'après ce principe qu'a été calculée la table suivante, qui permet de suite de connaître la manière dont varie la durée des vibrations, à mesure que l'on change la longueur du spiral.

Table donnant les rapports des nombres de vibrations d'un balancier, dans un même temps, pour des longueurs différentes d'un spiral.

RAPPORT des longueurs du spiral.	RAPPORT du nombre des vibrations dans un même temps.	RAPPORT des longueurs du spiral.	RAPPORT du nombre des vibrations dans un même temps.	RAPPORT des longueurs du spiral.	RAPPORT du nombre des vibrations dans un même temps.
0.99	1.0050	0.65	1.2403	0.31	1.7960
0.98	1.0101	0.64	1.2500	0.30	1.8257
0.97	1.0153	0.63	1.2599	0.29	1.8570
0.96	1.0206	0.62	1.2700	0.28	1.8898
0.95	1.0260	0.61	1.2803	0.27	1.9245
0.94	1.0314	0.60	1.2910	0.26	1.9612
0.93	1.0370	0.59	1.3019	0.25	2.0000
0.92	1.0426	0.58	1.3131	0.24	2.0412
0.91	1.0483	0.57	1.3245	0.23	2.0851
0.90	1.0541	0.56	1.3363	0.22	2.1320
0.89	1.0600	0.55	1.3484	0.21	2.1822
0.88	1.0660	0.54	1.3608	0.20	2.2361
0.87	1.0721	0.53	1.3736	0.999	1.00050
0.86	1.0783	0.52	1.3867	0.998	1.00100
0.85	1.0846	0.51	1.4003	0.997	1.00150
0.84	1.0911	0.50	1.4142	0.996	1.00200
0.83	1.0977	0.49	1.4286	0.995	1.00250
0.82	1.1043	0.48	1.4434	0.994	1.0030
0.81	1.1111	0.47	1.4587	0.993	1.0035
0.80	1.1180	0.46	1.4744	0.992	1.0040
0.79	1.1251	0.45	1.4907	0.991	1.0045
0.78	1.1323	0.44	1 5076	0.990	1.0050
0.77	1.1396	0.43	1.5250	0.989	1.0055
0.76	1.1471	0.42	1.5430	0.988	1.0061
0.75	1.1547	0.41	1.5618	0.987	1.0066
0.74	1.1625	0.40	1.5811	0.986	1.0071
0.73	1.1704	0.39	1.6013	0.985	1.0076
0.72	1.1785	0.38	1.6222	0.984	1.0081
0.71	1.1868	0.37	1.6440	0.983	1.0086
0.70	1.1952	0.36	1.6667	0.982	1.0091
0 69	1.2038	0.35	1.6903	0.981	1.9096
0.68	1.2127	0.34	1.7150	0.980	1.0101
0.67	1.2217	9.33	1.7408		
0.66	1.2309	0.32	1.7677		

Je ferai remarquer que, dans cette même table, on pourrait y regarder le rapport des longueurs du spiral comme remplacé par celui des moments d'inertie du balancier, pourvu qu'alors le spiral reste le même et que ce soit le balancier qui change.

Expériences pour vérifier la durée théorique des vibrations d'un balancier et d'un spiral déterminés. — Voici les résultats d'un certain nombre d'expériences que j'ai faites en vue de vérifier : 1° la formule (4) qui donne la durée des vibrations ; 2° la loi que je viens d'exposer de la proportionnalité de cette durée avec la racine carrée de la longueur du spiral.

	CONSTRUCTEURS.	DURÉE d'une vibration		NOMBRE de vibrations par heure	
		par la théorie.	par l'observation.	par la théorie.	par l'observation.
Montre (spiral plat)	Lépine	0''.20151	0''.200	17865	17770(*)
Chronomètre	M. Winnerl	0''.2486	0''.250	14482	14400
Chronomètre	M. Paul Garnier	0''.2479	0''.250	14522	14400
Spiral cylindrique de très-grandes dimensions (acier non homogène)	M. Paul Garnier	1''.196	1''.211	3010	2973
Spiral cylindrique de très-grandes dimensions (acier non homogène)	M. Paul Garnier	1''.244	1''.247	2895	2887
Spiral cylindrique de très-grandes dimensions (acier non homogène, mais spécial, n'ayant que 7 tours 1/4)	M. Paul Garnier	1''.127	1''.120	3195	3214

(*) Avec la raquette, le nombre de vibrations est 18000; mais il n'est que de 17770, la raquette enlevée.

On peut voir, dans mon mémoire déjà rappelé plus haut, toutes les mesures prises sur les appareils et avec lesquelles on peut vérifier les calculs dont les résultats sont sur le tableau ci-dessus.

Expériences pour vérifier la proportionnalité entre la durée des vibrations et la racine carrée de la longueur du spiral. — Voici maintenant une partie des expériences faites en vue de vérifier la loi importante de la proportionnalité entre la durée des vibrations et la racine carrée de la longueur du spiral.

MONTRE DE M. PAUL GARNIER (SPIRAL PLAT).

Le spiral a une longueur totale de $0^m.1645$.

Première observation. — On coupe un bout du spiral de $0^m.043$; la nouvelle longueur est donc de $0^m.1215$. La montre est mise à l'heure à $9^h\,34'$. Puis, quand l'heure réelle est midi $49'$, elle marque $1^h\,22'\,13''$. Donc, pendant $195'$, elle a marché de $228'.215$; d'où

Rapport des temps. . . . . = 0.85444
Rapport des racines carrées des longueurs. . . . . = 0.8594

Deuxième observation. — On a coupé un autre bout de $0^m.0365$, et la nouvelle longueur s'est trouvée de $0^m.085$.

La montre est mise à l'heure à midi $41'$. Puis, quand l'heure réelle est de $2^h\,21'$, elle marque $3^h\,2'\,30''$. Donc, pendant $100'$, elle a marché de $141'.5$; d'où

Rapport des temps. . . . . = 0.7067
Rapport des racines carrées des longueurs. . . . . = 0.7188

Si l'on compare le spiral réduit à $0^m.085$ avec ce qu'il était avant $0^m.1215$ de longueur, on a

Rapport des temps. . . . . = 0.8271.
Rapport des racines carrées des longueurs. . . . . = 0.8364

Les résultats sont, comme on voit, extrêmement rapprochés, et encore faut-il tenir compte : 1° de ce que la raquette du spiral n'avait pas été enlevée; 2° de ce que le spiral, surtout tellement raccourci, n'est pas dans les conditions de parfait isochronisme.

MONTRE DE LÉPINE (SPIRAL PLAT).

Le spiral a une longueur totale de $0^m.15375$. On enlève la raquette, afin de faire disparaître cette influence qui existait dans l'expérience précédente; puis, sans raccourcir le spiral, on observe la marche comparée avec celle d'une pendule très-régulière. A cet effet, la montre est mise à l'heure à $6^h\,30'$ du soir. Le lendemain matin, à $8^h\,29'$, elle marque $8^h\,16'$. Donc, pendant $839'$ réelles, la montre a marché de $826'$.

Première observation. — On coupe un bout de $0^m.0325$, ce qui réduit la longueur du spiral à $0^m.12125$.

On commence à observer à $6^h\,1'$ du soir (heure de la pendule), la montre avançant en ce moment de $\frac{1}{10}$ de minute. Le lendemain matin, à $8^h\,22'.2$ la montre marque $10^h\,4'$. Donc, pendant $861'.2$ de la pendule, la montre a marché de $962'.9$, et, pendant ce temps, la montre, avec la longueur primitive du spiral, eût marché de $\frac{826}{839} \times 861'.2$; d'où

Rapport des temps. . . . . = 0.8805
Rapport des racines carrées des longueurs. . . . . = 0.8880

Deuxième observation. — On coupe encore un bout de $0^m.03075$, ce qui réduit la longueur à $0^m.0905$.

La montre est mise d'accord avec la pendule à $2^h\,8'$ après midi. Le lendemain matin, à $8^h\,22'.33$, elle marque juste 2 heures. Donc, pendant $1094'.33$ de la pendule, la montre a marché de $1432'$, et, pendant ce même temps, la montre, avec la longueur primitive du spiral, eût marché de $\frac{826}{839} \times 1094'.33$; d'où

Rapport des temps. . . . . = 0.7524
Rapport des racines carrées et des longueurs. . . . . = 0.7672

Si l'on compare le spiral réduit à $0^m.0905$ avec ce qu'il était ayant $0^m.12125$ de longueur, on a

Rapport des temps. . . . . = 0.8545
Rapport des racines carrées et des longueurs. . . . . = 0.0639

Quand le spiral a été démonté, on a remarqué qu'il avait été gratté sur une certaine longueur, ainsi que cela se pratique quelquefois pour le réglage, ce qui apportait un léger trouble dans la vérification de la loi. J'ai donc fait mettre un nouveau spiral non gratté, et que j'ai observé.

MONTRE DE LÉPINE (AVEC LE NOUVEAU SPIRAL).

La longueur totale du spiral est de $0^m.1524$. Sans en rien retrancher, on commence à observer à 2 heures juste (heure de la pendule). A ce moment, la montre retarde de $\frac{1}{10}$ de minute. Le lendemain matin, à $8^h\ 18'$, la montre marque $6^h\ 34'$. Donc, pendant $1098'$ de la pendule, la montre a marché de $994'.1$.

Première observation. — On coupe un bout de spiral de $0^m.0320$, ce qui réduit la longueur à $0^m.1204$.

On commence à observer à midi $38'.9$ (heure de la pendule). A ce moment, la montre marque midi $38'$. Le surlendemain matin, à $8^h\ 43'$, la montre accuse $9^h\ 23'.75$. Donc, pendant $2644'.1$ de la pendule, la montre a marché de $2685'.75$, et, pendant ce même temps, la montre, avec la longueur primitive du spiral, eût marché de $\frac{994.1}{1098} \times 2644'.1$; d'où

Rapport des temps. . . . . = 0.8913
Rapport des racines carrées des longueurs. . . . . = 0.8889

Deuxième observation. — On a coupé un autre bout de 0^m0309, ce qui réduit la longueur du spiral à $0^m.0895$.

La montre est mise à l'heure de la pendule à midi $49'$.

Le lendemain matin, à $8^h\ 32'$ (heure de la pendule), la montre marque $11^h\ 51'.75$. Donc, pendant $1183'$ de la pendule, la montre a marché de $1382'.75$, et, pendant ce même temps, la montre, avec la longueur primitive du spiral, eût marché de $\frac{994.1}{1098} \times 1183'$; d'où

Rapport des temps. . . . . = 0.7746
Rapport des racines carrées des longueurs. . . . . = 0.7663

Si l'on compare le spiral réduit à $0^m.0895$ avec ce qu'il était ayant $0^m.1204$ de longueur, on a

Rapport des temps. . . . . = 0.8691
Rapport des racines carrées des longueurs. . . . . = 0.8622

GRANDS SPIRAUX DE M. PAUL GARNIER.

Ces appareils ont été montrés, au sujet de cette expérience, à la séance générale de la Société des horlogers, du 17 février 1861.

Ce sont deux grands spiraux cylindriques, dont les courbes terminales appartiennent à un système que j'appelle théorique et que j'expliquerai plus loin, et qui sont montés sur des balanciers égaux. Ils sont formés du même acier, ayant rigoureusement les mêmes dimensions tranversales, mais leurs longueurs diffèrent.

Comme il n'y a pas d'échappement, on a opéré en comptant exactement, pour chacun d'eux, le temps employé pour effectuer 300 oscillations.

Pour le premier, dont la longueur totale est de $1^{m}.6855$, ce temps a été de 244 secondes.

Pour le second, ayant une longueur de $1^{m}.3816$, la durée des 300 oscillations a été de 220″.6. Donc

Rapport des temps. . . . . = 0.904
Rapport des racines carrées des longueurs. . . . . = 0.905

SPIRAUX CONSTRUITS PAR M. ROZÉ.

(Exposés à l'Exposition universelle de Londres de 1862).

M. Rozé a aussi construit des spiraux pour répéter cette expérience. Ce sont trois spiraux cylindriques, montés sur des balanciers égaux. Ils sont formés du même fil d'acier à spiraux; seulement, l'un a une longueur de $995^{mil}.8$, le deuxième de $806^{mil},17$ et le troisième de 666 millimètres.

En les faisant osciller ensemble, pendant 182 secondes, le premier exécute 180 vibrations, et dans le même temps, le deuxième en fait 200 et le troisième 220.

En comparant le premier spiral au deuxième, on a donc

Rapport des temps. . . . . = 0.90000
Rapport des racines carrées des longueurs. . . . . = 0.89976

et ces deux rapports sont, pour ainsi dire, identiques.

De même si l'on compare le deuxième spiral au troisième, on a

Rapport des temps. . . . . = 1.1000
Rapport des racines carrées des longueurs. . . . . = 1.1002

ce qui est encore, pour ainsi dire, une identité.

Enfin, entre le premier et le troisième, on a

Rapport des temps. . . . . = 0.81818
Rapport des racines carrées des longueurs. . . . . = 0.81781

Allongements et raccourcissements proportionnels. — Il est important de connaître la quantité dont travaille le métal d'un spiral pendant son fonctionnement. L'élément dont on se sert pour mesurer ce travail est ce

que l'on appelle l'allongement ou le raccourcissement proportionnel. Je l'ai désigné par i dans mon mémoire, et j'ai démontré que la valeur de i est exprimée par la formule très-simple

$$i = \frac{e}{2}\frac{\alpha}{L} \tag{5}$$

dans laquelle e représente l'épaisseur du spiral perpendiculairement à l'axe du balancier; L, la longueur du spiral et α l'angle dont a tourné le balancier à partir de sa position d'équilibre. Il faut bien faire attention que, dans cette formule, l'angle α ne doit pas être exprimé en degrés, mais qu'on doit mettre pour α la longueur linéaire de l'arc correspondant à cet angle dans une circonférence dont le rayon serait égal à l'unité, c'est-à-dire à 1 mètre. Quant aux dimensions e et L, elles sont rapportées au mètre comme unité.

La formule précédente montre que l'on a les lois suivantes :

1° La quantité dont le métal du spiral travaille est constante dans toute son étendue ;

2° Elle est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à l'épaisseur du fil;

3° Elle est, toutes choses égales d'ailleurs, en raison inverse de la longueur du fil ;

4° Elle est, toutes choses égales d'ailleurs, proportionnelle à l'angle dont le balancier a tourné.

En résumé, si l'épaisseur du fil devenait deux, trois fois plus grande, le métal travaillerait deux, trois fois plus ; si la longueur du spiral devenait deux, trois fois plus grande, le métal travaillerait deux, trois fois moins ; si le balancier tournait d'un angle deux, trois fois plus grand, le métal travaillerait deux, trois fois plus.

Des courbes extrêmes qui terminent un spiral. — Supposons d'abord qu'il s'agisse du spiral cylindrique des chronomètres. Quand on étudie par le calcul les conditions d'isochronisme, on trouve qu'il est avantageux que le spiral réunisse les trois conditions suivantes :

1° Que le centre de gravité du spiral entier soit sur l'axe du balancier;

2° Que le spiral, dans ses déformations, reste toujours bien cylindrique et concentrique à l'axe;

3° Que le balancier n'exerce, dans le jeu du spiral, aucune pression latérale contre ses pivots.

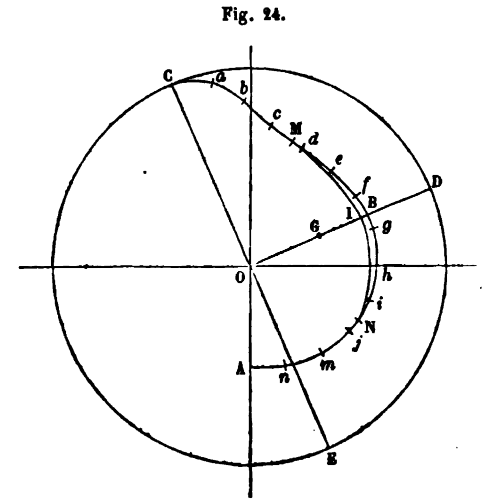
Le calcul n'indique pas qu'il n'y ait pas d'autre manière possible d'atteindre l'isochronisme. Mais il met celle ci-dessus tout à fait en évidence.

Il s'agit maintenant de faire voir quelles sont les courbes extrêmes qui satisfont aux conditions précédentes. Or, il est remarquable que le même type de courbe les remplit toutes les trois et ce type n'est pas unique,

mais comprend une infinité de formes différentes, qui sont seulement assujetties à avoir leur centre de gravité placé d'une certaine façon.

Ainsi (fig. 24), si ABMC est la courbe qui termine le spiral et si G est le centre de gravité de cette courbe, il faut et il suffit :

Fig. 24.



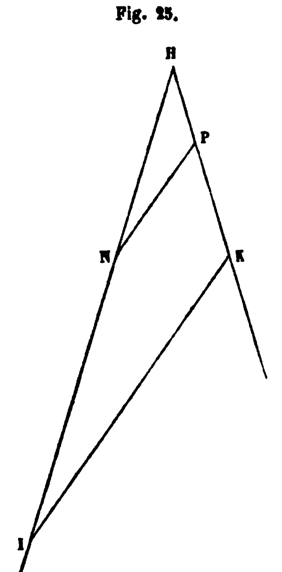
1° Que O étant le centre du spiral, OG soit perpendiculaire au rayon OC, où la courbe AMC se détache des spires ;

2° Que OG soit une troisième proportionnelle au rayon OC et à la longueur ABMC de la courbe, ou que l'on ait

$$(6) \qquad OG = \frac{(OC)^2}{ABMC},$$

ou encore, pour représenter cette dernière condition par une construction, si l'on prenait sur les deux côtés d'un angle (fig. 25), HI égal à la longueur de la courbe ABMC ; puis HK égal au rayon OC des spires et HN = HK ; enfin que l'on mène NP parallèle à IK, HP devrait être égal à OG.

Fig. 25.



Ainsi, si un spiral se termine à ses deux bouts par deux courbes parallèles de cette espèce, on sera assuré :

1° Que son centre de gravité est sur l'axe du balancier ;

2° Qu'il restera toujours, dans ses déformations, bien cylindrique et concentrique à l'axe ;

3° Que le balancier n'exercera, dans son mouvement, aucune pression latérale contre ses pivots.

Isochronisme pratique.—Toutes ces conditions, qui, ainsi que je l'ai déjà dit, sont indiquées par la théorie comme favorables pour l'isochronisme, se trouvent ainsi satisfaites à la fois. De plus, il est à remarquer qu'elles le sont, quelle que soit la position relative des deux courbes terminales l'une au-dessus de l'autre, de sorte que, sans altérer en rien ces conditions, on peut, ainsi que cela est d'usage dans la pratique, faire varier la longueur totale du spiral ou la position relative des deux courbes terminales, de manière à arriver aux dernières limites d'isochronisme pratique. En effet, ces courbes résolvent la question de l'isochronisme, mais en ne tenant pas compte de certaines in-

fluences minimes, qu'il est impossible de faire entrer dans les calculs, comme celles des huiles, des frottements, de l'inertie du spiral, etc. Il faut donc un peu de tâtonnements pour obtenir les dernières limites d'isochronisme, ou plutôt, comme cela se fait généralement, pour obtenir une avance de quelques secondes, par vingt-quatre heures, des petits arcs sur les grands arcs.

Nouveau moyen d'avoir les dernières limites d'isochronisme pratique. — Il arrive assez souvent qu'avec les courbes théoriques et le calibre ordinairement employé par les constructeurs français, on a un peu trop d'avance des petits arcs sur les grands et que le changement de longueur du spiral ne modifie que peu ce résultat, à cause de la suppression de la poussée latérale et, par suite, du frottement du balancier contre ses pivots. Cet effet est dû très-probablement à l'échappement, ainsi que cela paraît résulter des recherches théoriques de M. Yvon Villarceau (*Annales de l'observatoire impérial de Paris*, tome VII). J'indiquerai, pour corriger cet effet, un moyen que j'ai imaginé et que plusieurs années d'expériences n'ont jamais trouvé en défaut : c'est d'adapter, sur les deux masses compensatrices du balancier ou sur les bouts de la barrette, deux petites ailettes légères, par exemple en aluminium. Elles sont rectangulaires et disposées perpendiculairement à la circonférence du balancier. Elles ont toujours pour effet de diminuer l'avance des petits arcs, avec un spiral théorique. En les prenant plus ou moins grandes, on peut graduer leur action à volonté. Ce moyen est très-simple, facile à appliquer, n'exige aucune déformation du spiral, et il s'applique toujours à coup sûr. Seulement, il diminue un peu l'amplitude des arcs, et, si l'on juge celle-ci insuffisante, on est conduit à augmenter un peu le ressort moteur, par exemple en donnant plus de hauteur au barillet, ainsi que le fait un de nos constructeurs, qui fait usage de ce procédé.

Autres propriétés des courbes terminales théoriques. — Les courbes extrêmes théoriques, définies précédemment, ont encore diverses propriétés, qu'il est important de signaler :

1° Grâce à elles, la matière du spiral travaille uniformément dans toute son étendue.

2° Le spiral se déformant toujours, dans son jeu, d'une manière parfaitement cylindrique et concentrique à l'axe, on évite par là la perturbation introduite par le mouvement du spiral qui, avec une forme différente, se jette de côté et d'autre de l'axe du balancier.

3° Toute poussée latérale contre les pivots du balancier étant supprimée, on évite par là le frottement correspondant, et surtout les irrégularités de ce frottement, résultant de l'épaississement des huiles.

Variation du rayon du spiral pendant ses vibrations. — Il est intéressant de connaître les variations que subit le rayon du spiral, pendant ses

vibrations. Elles sont données par les deux formules suivantes, qui sont très-simples :

$$r = \frac{r_0}{1 + \frac{\alpha r_0}{L}} \qquad (7)$$

et

$$r = \frac{r_0}{1 - \frac{\alpha r_0}{L}} \qquad (8)$$

La première convient au cas où le spiral se referme; la seconde, à celui où il s'ouvre.

Dans tous les deux, r représente le rayon du spiral déformé, r_0, son rayon de fabrication, L, sa longueur totale et α l'angle dont le balancier s'est écarté de sa position d'équilibre, mais estimé, ainsi qu'il a été déjà dit précédemment, en longueur d'arc dans le cercle dont le rayon est l'unité.

On tire de ces deux formules les deux suivantes, savoir :
de la première,

$$r_0 - r = \frac{\frac{\alpha r_0^2}{L}}{1 + \frac{\alpha r_0}{L}} \qquad (9)$$

et de la seconde,

$$r - r_0 = \frac{\frac{\alpha r_0^2}{L}}{1 - \frac{\alpha r_0}{L}}, \qquad (10)$$

et ceci fait voir que, pour un même angle de rotation du balancier, de part et d'autre de sa position d'équilibre, la diminution du rayon du spiral, quand il se referme, est moindre que son augmentation, quand il s'ouvre, ce qui est conforme à l'expérience.

Méthode pour trouver graphiquement les courbes extrêmes qui conviennent à chaque cas. — Je vais maintenant expliquer la manière de trouver, par des tracés simples, les courbes extrêmes qui conviennent à chaque cas.

Je suppose que l'on se donne (fig. 24) la position du point A et celle du point C, qui représentent les deux extrémités de la courbe ABMC, que l'on cherche.

On mène le rayon extrême OC et le rayon perpendiculaire OD, sur lequel doit se trouver le centre de gravité, G, de cette courbe.

Le dessin étant supposé fait à une échelle suffisamment grande (la plus commode m'a paru être de vingt à trente fois la grandeur réelle), on s'occupera d'abord d'obtenir une courbe dont le centre de gravité soit sur OD.

A cet effet, on tracera une première courbe, ABMC, de sentiment, mais tangente en C aux spires. Puis, pour vérifier, on la partagera en éléments suffisamment petits et égaux, dix ou douze par exemple, C*a*, *ab*, *bc*, *cd*, etc.; le dernier élément A*n* seul sera généralement plus petit que les autres. On marquera de suite le centre de gravité de chaque élément, en le considérant comme une petite ligne droite, c'est-à-dire en en marquant le milieu ou, suivant les cas, comme un petit arc de cercle, ce qui place le centre de gravité un peu dans la concavité de l'arc. Pour chacun de ces centres de gravité, on mesurera sa distance à OD et l'on modifiera celle relative à A*n*, en la multipliant par le rapport de A*n* à la longueur commune de tous les autres arcs.

Avec cette modification, il devra arriver que la somme des distances des centres de gravité, qui sont d'un côté de OD, soit égale à la somme des distances de ceux qui sont situés de l'autre côté.

Si cette condition n'est pas remplie, il sera très-facile de modifier l'une des deux portions de la courbe, de manière à y arriver.

Ce premier point établi, il reste encore à satisfaire à la seconde condition, à savoir que la distance OG du centre de gravité au centre O soit égale au carré du rayon des spires, divisé par la longueur de la courbe extrême.

Or, pour obtenir la distance du centre de gravité de la courbe au point O, on mesurera celle des centres de gravité de tous les petits arcs, C*a*, *ab*, *bc*, etc., à la ligne COE; on modifiera celle de ces distances qui répond à A*n*, en la multipliant par le rapport de A*n* à la longueur des autres petits arcs. On prendra la somme de toutes les distances qui sont à droite de CE, c'est-à-dire du même côté que B, et l'on en retranchera la somme de celles qui sont de l'autre côté de CE. On multipliera le résultat par la longueur commune des éléments, C*a*, *ab*, *bc*, etc., et l'on divisera le produit par la longueur de la courbe ABMC. Ce quotient, qui donnera la distance OG, devra être égal au carré du rayon des spires, divisé par la longueur de ABMC. Cette égalité n'aura pas lieu généralement du premier coup, mais il sera facile de modifier la courbe ABMC de manière à y arriver, tout en continuant de satisfaire à la première condition. En effet, supposons, pour fixer les idées, que la distance OG, ainsi obtenue, soit supérieure au carré du rayon des spires, divisé par la longueur de la courbe. On prendra, de part et d'autre du point B, deux arcs BM et BN tels que le centre de gravité de leur ensemble soit sur OD, ce qu'il sera aisé de vérifier, et l'on remplacera l'arc MBN par un arc intérieur MIN dont le centre de gravité soit aussi sur OD et dont le moment, par rapport à CE, sera évidemment moindre. Il est clair qu'on arrivera ainsi très-vite au résultat cherché, et c'est en effet par ce procédé que j'ai déterminé les tracés des courbes extrêmes, qui sont joints à ce travail.

Du reste, on comprend que l'on peut facilement varier ces tâtonne-

ments, qui sont toujours très-simples et qui conduisent très-vite au résultat cherché.

On réduira ensuite la courbe extrême à sa vraie grandeur par une courbe semblable tracée autour du centre.

On voit représentés (Pl. XIII, à gauche, fig. 1 à 12 inclusivement) un certain nombre de types de courbes extrêmes théoriques, qui ont été obtenues de la manière que je viens d'exposer. Chaque courbe est figurée de deux grandeurs, dont la plus petite est à peu près celle d'exécution.

On peut remarquer que le type de la figure 9 se compose de deux quarts de cercle, réunis par une ligne droite; chacun de ces quarts de cercle a un rayon égal à la moitié de celui des spires. Le type de la figure 11 est une demi-ellipse. Son grand axe est égal au diamètre des spires et son petit axe en est les 0.58. La longueur de cette demi-ellipse est juste 0.8 de celle d'une demi-spire.

De l'effet de la température sur le spiral. — On sait que les variations de la température influent sur la marche d'un chronomètre ou d'une montre. On a déjà combattu cette cause d'irrégularité par l'emploi du balancier compensateur. Je me suis occupé spécialement de l'effet produit sur le spiral cylindrique par la dilatation. Celle-ci, en déformant le spiral, altère sa forme, qui peut cesser d'appartenir rigoureusement à un des types théoriques; de plus, si le spiral était, en construction, monté librement sur le balancier, il peut, par la même cause, cesser de l'être et devenir gêné dans les encastrements de ses extrémités. Ces effets sont sans doute très-minimes, mais ils existent. Or, j'ai démontré que si les courbes extrêmes du spiral sont d'un des types théoriques aboutissant au centre des spires, les deux effets dont il est question ne se produisent plus par les changements de température. J'ai même fait voir que le spiral serait encore soustrait à ces perturbations, avec des courbes théoriques quelconques, c'est-à-dire aboutissant ou n'aboutissant pas au centre des spires, pourvu que, dans ce dernier cas, la connexion des extrémités du spiral à l'axe eut lieu par des pièces du métal même dont est formé le spiral, c'est-à-dire très-généralement d'acier.

Du spiral plat. — La théorie indique, conformément du reste à l'expérience, que le spiral plat ordinaire ne se prête guère qu'à un isochronisme relatif. Elle fait voir qu'il faut alors que le spiral soit construit de telle sorte que son centre de gravité soit sur l'axe du balancier.

On améliore cependant beaucoup les résultats en faisant usage du spiral à courbe ramenée, et il convient alors de prendre, pour cette courbe, un des types théoriques que j'ai décrits précédemment. Il en existe déjà d'assez nombreux exemples.

Expériences sur la déformation de spiraux munis de courbes extrêmes théoriques. — Je passe maintenant aux expériences que j'ai faites au sujet

des courbes terminales des spiraux, en commençant par celles qui sont relatives à la déformation des spiraux, pendant leur fonctionnement.

A cet effet, j'ai fait faire par M. Paul Garnier des spiraux d'un très-grand diamètre. On a donné aux uns des courbes extrêmes théoriques, puis aux autres des courbes quelconques, afin de juger de la différence. Ces spiraux peuvent être rangés par groupe de deux. Ces groupes diffèrent entre eux par l'angle de développement de la courbe extrême autour du centre des spires ; mais, pour les deux spiraux d'un même groupe, cet angle est le même ; seulement, l'un d'eux a des courbes extrêmes théoriques et l'autre, des courbes non théoriques. La planche XIII, *fig.* 1 à 14, à droite, montre, pour les spiraux groupés de cette façon, le résultat des déformations qui ont été relevées expérimentalement. Chaque cercle a été obtenu au moyen de quatre ou cinq points. Le cercle, en trait plein, indique ce qu'était le spiral en équilibre ; les cercles, en pointillé, montrent ce qu'il est devenu dans les déformations extrêmes. Or, on voit, d'après les tracés, que, avec les courbes terminales théoriques, les trois cercles répondant à un même spiral sont toujours restés bien concentriques et qu'il s'en faut de beaucoup qu'il en soit ainsi pour les spiraux qui avaient des courbes non théoriques.

Les numéros inscrits sur la circonférence des cercles sont ceux qui ont été effectivement relevés pour les tracer.

J'ajouterai que tous les appareils qui ont été faits depuis ont toujours donné le même résultat.

Expériences sur la progression de force des spiraux munis de courbes extrêmes théoriques ou non théoriques. — J'ai fait de nombreuses expériences sur le degré plus ou moins approché de proportionnalité entre les forces nécessaires, pour tenir le balancier écarté de sa position d'équilibre, et les angles d'écartement correspondants. Ces expériences ont eu lieu sur de très-grands spiraux, construits *ad hoc* par M. Garnier, et pourvus, les uns de courbes théoriques, les autres de courbes non théoriques. Elles ont été faites à l'aide d'une balance élastique d'une très-grande précision, par conséquent, par le procédé employé anciennement par F. Berthoud, mais perfectionné par les moyens plus précis dont on dispose maintenant. Les résultats de ces expériences sont compris tout au long en huit tableaux dans mon mémoire original. Je me bornerai ici à dire qu'ils constatent invariablement une proportionnalité beaucoup plus parfaite entre l'action du spiral sur le balancier et l'angle d'écartement correspondant du balancier, pour les spiraux terminés par des courbes théoriques, que pour ceux munis de courbes extrêmes non théoriques.

Depuis la rédaction de mon mémoire, un grand nombre de chronomètres ont été construits d'après les principes théoriques qui y sont exposés.

CHAPITRE III.

APPLICATION DE L'ÉLECTRICITÉ A L'HORLOGERIE.

Généralités. — L'idée d'utiliser l'électricité dynamique, dans les appareils destinés à la mesure du temps, peut être regardée comme contemporaine de celle qui a eu pour objet d'appliquer le même agent à la transmission de la pensée humaine à des distances quelconques. Mais, si ces deux genres d'application de l'électricité ont pris naissance à la même époque, ils ne se sont pas développés parallèlement et, aujourd'hui encore, l'horlogerie électrique est loin d'avoir pris l'extension à laquelle elle semblait appelée.

Cet insuccès relatif doit être attribué à des causes multiples, dont la principale tient, suivant nous, à ce qu'on n'a généralement pas bien compris le rôle qu'il convenait de faire jouer à l'électricité dans l'horlogerie.

En principe, l'électricité peut être utilisée de deux manières, soit comme *véritable moteur*, soit, simplement, comme *agent de transmission à distance*. Dans le premier cas, l'horlogerie électrique tend à remplacer l'horlogerie ordinaire. Dans le second, au contraire, elle lui vient simplement en aide, en fournissant des résultats que celle-ci ne peut pas produire, tels que la répartition exacte de l'heure sur différents points, la régularisation de l'heure fournie par des horloges ordinaires, etc.

Ce dernier mode d'utilisation de l'électricité a déjà amené de notables perfectionnements dans le système des horloges publiques, et c'est le seul qui paraisse véritablement appelé à une grande extension.

Le travail mécanique développé par l'électricité correspond, en effet, à une dépense relativement très-élevée, et le rôle des appareils de transmission, basés sur son emploi, se limite, de plus en plus, à la manifestation de signaux et d'actions mécaniques extrêmement faibles.

Emploi de l'électricité comme agent de transmission. — Les premiers essais sérieux de ce mode d'application de l'électricité à l'horlogerie remontent à l'année 1840.

Pour faire comprendre le principe de ce genre d'application, imaginons qu'une horloge ordinaire, à poids ou à ressort, soit munie d'une roue additionnelle de 12 dents, à laquelle le rouage fait faire un tour en une minute.

Chaque dent, à son passage, peut soulever un petit levier, qui, par un mouvement de bascule, fermera et interrompra successivement le circuit d'un courant électrique. Cet effet se traduira par un mouvement de va-et-vient, à chaque intervalle de 5 secondes, dans un certain nombre de stations, en communication avec le courant électrique.

Chacune de ces stations étant munie d'un électro-aimant, traversé par le fil conducteur, le mouvement de va-et-vient de l'armature pourra être facilement transformé en mouvement circulaire, au moyen d'un petit levier, agissant sur une roue à rochet. Si cette roue a, par exemple, 720 dents et que chaque oscillation la fasse avancer d'une dent, comme ce jeu se répète douze fois par minute, cette roue fera un tour entier en une heure. L'axe de cette roue pourra donc recevoir directement une aiguille, susceptible d'indiquer les minutes sur un cadran. L'addition d'un rouage ordinaire de minuterie permettra d'obtenir l'indication des heures sur le même cadran.

On voit, d'après cela, que l'horloge électrique de chaque station se composera simplement d'une roue de 720 dents et de deux roues de minuterie avec leurs pignons. On peut, d'ailleurs, multiplier à volonté le nombre des stations sur le trajet du circuit, à la seule condition de disposer d'une source d'électricité suffisante.

Pour donner l'impulsion à toutes ces horloges, il suffira d'établir la communication entre le fil conducteur et l'horloge ordinaire, faisant ici fonction de régulateur. Pour que l'heure, marquée par cette horloge, se trouve répétée, d'une manière invariable, à toutes les stations, on commencera par mettre toutes les aiguilles sur une heure convenue, midi, par exemple, et l'on n'établira la communication, dont il vient d'être question, qu'au moment où le régulateur marquera précisément cette heure.

Emploi de l'électricité comme moteur. — Après avoir réalisé un certain nombre d'applications du genre de celles dont nous venons d'indiquer le principe, on a voulu aller plus loin et l'on a cherché à substituer l'électricité à la force motrice, fournie par les poids ou les ressorts.

Ce résultat a été obtenu, en disposant un électro-aimant de manière à lui faire attirer une masse de fer faisant partie du balancier.

Horloge électrique de Froment. — La *fig.* 10, Pl. X, représente la disposition de l'horloge électrique construite, en 1855, par M. Froment.

Le pendule à secondes B, suspendu, comme à l'ordinaire, par des ressorts métalliques, porte un appendice A, traversé par une vis *a* et qui est en communication, par des parties métalliques, avec le fil conducteur *m*. Le courant arrive donc, sans solution de continuité, jusqu'au bout de la vis *a*. Au-dessus de cette vis, et à une faible distance, se présente une petite masse *b*, portée par un ressort, long et flexible, *bc*, dont le pied est fixé à un pont faisant corps avec la platine.

Dans la position indiquée sur la figure, cette masse s'appuie à l'extrémité d'un levier *sr*, mobile autour de l'axe *f*, et dont l'autre bout repose sur une vis *t*; la course de ce levier est limitée par une seconde vis *t'*, très-rapprochée de la première. En *p*, il porte un double renflement, correspondant aux pôles des deux électro-aimants E, E', qui peuvent ainsi le soulever, mais sans jamais l'amener au contact, par suite de la présence de la vis *t'*, réglée de manière à laisser un léger intervalle entre ces pôles et le levier. On évite ainsi les adhérences variables, qui se produiraient forcément entre des pièces en contact par de grandes surfaces. Le levier *rs* est disposé de telle sorte que le bras *r* emporte, non-seulement le bras *s*, mais encore la masse *b*.

Les deux fils *m* et *n* viennent aboutir aux deux pôles d'une pile, et le courant électrique se trouve établi, toutes les fois que la vis *a* est en contact avec la masse *b*. Tout l'appareil est, d'ailleurs, monté sur une plaque, composée d'une matière isolante.

Sur la figure, le pendule est supposé au repos; il n'y a donc pas contact entre la vis *a* et la masse *b*, de telle sorte que le circuit n'est pas fermé. Mais, si l'on vient à écarter le pendule vers la gauche, on produit ce contact et le courant se trouve établi.

Les électro-aimants soulèvent alors l'armature *p*, le bras *r* vient presser contre la vis *t'*, en même temps que le bras *s* s'abaisse. La masse *b*, n'étant plus retenue par ce bras, restera en contact avec la vis *a*, et exercera, par son intermédiaire, une certaine pression sur la pièce A du pendule, qu'elle accompagnera dans son double mouvement d'allée et de retour. Dans ce dernier mouvement, la masse *b*, en rencontrant le bout du levier *s*, se trouvera subitement arrêtée et se séparera du pendule, qui achèvera librement son oscillation de droite. Au moment où cesse le contact entre la vis *a* et la masse *b*, le courant est interrompu et les électro-aimants deviennent inactifs. Le bras de levier *r* n'étant plus attiré, retombe, sous l'action de son poids, en soulevant, en même temps, la masse *b* par son autre extrémité *s*.

Toutes les pièces se retrouvent alors dans la position de repos et elles n'en sortiront que lorsque le pendule, en recommençant son oscillation vers la gauche, produira de nouveau la fermeture du circuit et, par suite, la série des effets que nous venons d'analyser.

Dans cet appareil, l'électricité est utilisée, comme on le voit, pour soulever un levier et, par suite, un poids, destiné à restituer au pendule les pertes dues aux diverses résistances. Ce poids agit alternativement dans le sens de l'oscillation et en sens contraire; mais, comme cette dernière action a une durée moins longue que l'autre, la différence se fait sentir sur le pendule dans le sens favorable à l'entretien de son mouvement.

L'horloge de M. Froment peut, à la rigueur, être considérée comme une horloge à remontoir d'égalité, dans laquelle le moteur principal se

trouverait remplacé par l'électricité, le moteur secondaire étant toujours un poids.

Dans les ateliers de l'habile constructeur que nous venons de citer, le même appareil électrique fait mouvoir un certain nombre d'horloges, qui se composent d'une minuterie ordinaire, mise en jeu à l'aide d'une roue de 60 dents. Des électro-aimants, adaptés à chaque horloge et établis sur le parcours du courant, ont pour effet de faire sauter une dent de cette roue à chaque oscillation du pendule régulateur.

Horloge électrique de M. Vérité. — L'horloge électrique de M. Vérité, de Beauvais, qui a été présentée par son auteur, en 1853, est basée sur le même principe que celle de M. Froment.

Le rôle de l'électricité, dans cette horloge, se borne à faire attirer successivement, par deux électro-aimants, placés de chaque côté du pendule, une bascule, dont le milieu est formé d'une substance non conductrice et dont les deux extrémités sont en fer doux. Chaque bras de cette bascule porte un petit poids, suspendu à un fil métallique très-flexible, au-dessus d'une barrette, fixée en haut du pendule et en croix avec lui.

Le circuit s'établit du pendule à la pile et de celle-ci aux électro-aimants, au moyen d'une bifurcation du fil conjonctif, qui se termine, à la sortie de la bobine, par le fil, beaucoup plus fin, qui suspend les deux petits poids au-dessous de la bascule.

Si l'on suppose le pendule écarté de la verticale, jusqu'à ce que la barrette vienne en contact avec le petit poids de gauche, le circuit se ferme, le courant s'établit et l'électro-aimant de ce côté attire à lui le bras gauche de la bascule, ce qui a pour résultat de faire peser le petit poids sur le bras gauche de la barrette et de donner au pendule l'impulsion de gauche à droite, impulsion qui se continue pendant toute la durée du contact de la petite boule et de la barrette. Lorsque ce contact cesse, le pendule continue son mouvement, en vertu de la vitesse acquise, et le bras droit de la barrette venant toucher l'autre boule, ferme de nouveau le circuit; le courant passe alors dans l'électro-aimant de droite et donne lieu aux mêmes effets que pour le côté gauche.

L'impulsion se trouve ici donnée des deux côtés, tandis que, dans l'horloge de Froment, elle ne l'est que d'un seul. Malgré cette différence, les deux appareils doivent être considérés comme basés sur le même principe.

Les variations de la force électrique sont sans influence sur la marche du pendule. L'impulsion a toujours pour mesure la hauteur constante, dont descend la petite boule, jusqu'au moment où cesse le contact. Cette pièce peut donc être regardée comme étant réellement à *force constante*.

Pendule électro-magnétique de M. E. Garnier. — Parmi les causes, auxquelles il convient d'attribuer les irrégularités de marche de certaines

horloges électriques, on doit compter, d'après certains constructeurs, l'oxydation que produit l'étincelle sur l'interrupteur, surtout quand l'interruption du courant a lieu entre la tige du pendule et le ressort, destiné à entretenir son mouvement. Il se produit, en effet, dans ce cas, entre ces deux organes, un collage irrégulier, de nature à troubler sensiblement l'isochronisme des oscillations. Cette oxydation ne pouvant être complétement empêchée, M. E. Garnier a cherché à faire disparaître ses effets les plus fâcheux, en isolant l'interrupteur du balancier.

Le dispositif, qu'il a proposé dans ce but, se trouve représenté *fig.* 2 et 4, Pl. X.

Le ressort moteur R (*fig.* 2) porte un appendice en platine *a* et une semelle *b*, sur laquelle agit le bras courbe, fixé à la partie supérieure de la tige du pendule. Au-dessous de l'appendice *a* se trouve une pièce C, qui porte une vis en platine. Cette pièce C, qui est représentée plus distinctement dans la *fig.* 4, fait partie d'un levier calé sur l'axe de rotation de l'armature de l'électro-aimant E. Sur le même axe se trouve monté le levier ST, qui porte le cliquet d'impulsion et le bras I, sur lequel agit un ressort antagoniste. Le déplacement angulaire du levier de l'armature est limité par les deux vis d'arrêt L et M.

Dans la position indiquée sur la figure, le bras du pendule ne touchant pas le ressort moteur R, la pièce C est en contact avec l'appendice *a*, et le courant se trouve fermé à travers l'électro-aimant E; l'armature est, par suite, attaché à cet électro-aimant et le levier C (*fig.* 4) est soulevé. Mais, lorsque le bras du pendule vient rencontrer le ressort R, le courant se trouve rompu, l'armature se détache et le levier C s'abaisse; le ressort R appuie alors sur le bras du pendule et lui restitue une quantité de mouvement, qui dépend de l'écartement entre les pièces C et *a*. Lorsque le ressort vient rencontrer C, il se trouve retenu, l'impulsion est terminée et le courant rétabli dans l'électro-aimant. Le levier C se relève, en tendant le ressort R, qui se trouve prêt à fournir une nouvelle impulsion.

En même temps que le levier C relève le ressort R, le levier TS agit, par son cliquet, sur la roue à rochet V et la fait avancer d'une dent, pour une oscillation complète du pendule (aller et retour). Le pendule battant la seconde, la roue à rochet, qui a 60 dents, fait donc un tour sur elle-même en une minute. Ce mouvement, transmis aux organes d'une minuterie spéciale, permet de lire l'heure sur un cadran.

La minuterie, adoptée par M. Garnier, a l'avantage d'éviter l'emploi d'une vis sans fin, qu'on rencontre, comme nous le verrons, dans certaines horloges électriques, et qui paraît devoir être condamnée pour l'horlogerie de précision.

Cette minuterie, que représente la *fig.* 3 (Pl. X), se compose essentiellement de trois roues A, B, C, dont l'une B peut tourner librement sur

l'axe creux de la roue des minutes A. La roue des heures C est à rochet et montée sur un canon à frottement libre sur le canon de la roue A.

Le mouvement est communiqué à la minuterie par la roue B et par l'intermédiaire de deux ressorts frotteurs r et r', qui l'appuient contre l'assiette de la roue A ; cette disposition a pour but de faciliter la remise des aiguilles à l'heure, sans qu'il soit nécessaire d'agir sur le mécanisme commandé par la roue à rochet. Ce mécanisme se compose simplement d'un pignon G, engrenant avec une roue D, dont l'axe porte un pignon H, qui commande la roue B. Les rapports des pignons G et H aux roues D et B sont respectivement 1 à 7,5 et 1 à 8. La roue A commande une petite roue I, dont l'axe porte un doigt K, destiné à agir sur la roue des heures C, qui est à rochet, comme nous l'avons dit. Les roues I et A sont dans le rapport de 1 à 4.

D'après les rapports que nous venons d'indiquer, pour les différents organes de cette minuterie, il est évident que, lorsque la roue à rochet V a fait un tour, la roue D et le pigeon H n'en ont fait que $\frac{1}{7,5}$; par conséquent, la roue B n'a fait que $\frac{1}{7,5} \times \frac{1}{8}$ ou $\frac{1}{60}$ de tour. Un tour entier de la roue B correspond donc à 60 tours de V ou à une durée d'une heure. La roue I faisant 4 tours par heure, le doigt K, dans ce même temps, fera sauter 4 dents de la roue C et, comme cette roue a 48 dents, elle accomplira un tour entier en 12 heures. Elle représentera donc bien la roue des heures, de même que la roue B celle des minutes. Une aiguille, fixée sur l'axe de la roue à rochet V, marquera naturellement les secondes.

Pendule électrique à sonnerie de M. Robert Houdin. — M. Robert Houdin est l'auteur d'une disposition de pendule électrique, extrêmement simple, qui peut s'adapter à toute minuterie de cadrans, grands ou petits. Il lui a ajouté une sonnerie électro-magnétique, qui peut être complétement indépendante et être placée à une distance quelconque de la pendule, sans nécessiter une pile particulière. Cette sonnerie peut même être remplacée par plusieurs autres, disposées en des points différents, sans rien changer au mode de fonctionnement.

L'appareil chronométrique et la sonnerie de cette pendule sont représentés *fig.* 5, 6 et 7 (Pl. X).

Dans le support S (*fig.* 6) de la suspension du pendule sont encastrées deux lames isolées, dont l'une soutient la tige et l'autre le levier d'impulsion I. La première de ces lames est mise en rapport avec le pôle négatif de la pile P, par l'intermédiaire de l'électro-aimant E, tandis que la seconde communique directement avec le pôle positif.

Si l'on écarte le pendule vers la droite, le circuit se trouve fermé, à travers l'électro-aimant E, par l'arc C et le levier I ; l'armature A est attirée

et fait sauter une dent de la roue à rochet *r*. Le mouvement de l'armature détermine l'abaissement du support *s* et le levier I, n'étant plus soutenu, vient appuyer sur l'arc C, en communiquant une impulsion au pendule. La succession d'actions de ce genre suffit, d'après ce que nous avons dit, pour entretenir la marche de ce pendule et mettre en mouvement une minuterie. La roue à rochet *r*, qui a 60 dents, porte sur son axe une vis sans fin, qui engrène avec la roue des minutes M.

Dans l'oscillation du pendule vers la gauche, l'armature A s'éloigne et entraîne le support *s*, qui soulève le levier I. Le courant, ayant abandonné l'arc C, passe par le support *s*, gagne le fil F, en contact avec lui, par l'intermédiaire du pont qui le supporte, et peut alors agir sur la sonnerie, comme nous allons l'indiquer.

Le circuit auquel appartient le fil F se bifurque en formant deux circuits dérivés, complétés par des interrupteurs.

L'un de ces interrupteurs, constitué par la bascule B et le doigt D, est mis en jeu par deux goupilles *g*, *g'*, fixées sur la roue M et qui, à des intervalles de 30 minutes, produisent la rencontre du doigt D et de l'extrémité *e* de la bascule; la fermeture qui en résulte pour le circuit ne dure d'ailleurs qu'une seconde, car le doigt D, fixé sur l'axe de la roue à rochet *r*, fait son tour entier en une minute.

Le second interrupteur, constitué par le ressort R (*fig.* 5) et le butoir K, relié à la bascule B, fonctionne sous l'action d'une roue de compte *r''*, qui dépend elle-même du jeu de la sonnerie. Toutes les fois qu'un cran saillant de cette roue vient en présence de la dent *d*, que porte le ressort R, ce ressort est écarté du butoir K et le circuit se trouve rompu.

Il se trouve, au contraire, fermé, lorsque la roue de compte amène une partie creuse en regard de la dent *d*. Il est évident que la durée de ces ouvertures et fermetures du circuit dépend de l'écartement des crans de la roue de compte. L'axe de cette roue porte une roue à rochet *r'*, sur laquelle agit l'armature d'un électro-aimant E', interposé dans un troisième circuit dérivé, aboutissant également à la pile P. Pour que ce circuit puisse être complété, il est indispensable que l'un ou l'autre des deux interrupteurs précédents ait préalablement fermé le circuit qui lui correspond. Alors, pour chaque fermeture du courant, produite par le contact du support *s* avec le levier I (*fig.* 6), l'électro-aimant E' fait avancer d'une dent le rochet *r'*, et son armature frappe un coup sur le timbre T.

Le jeu de la sonnerie, comme il est facile de le voir, ne peut avoir lieu que sous l'influence de la minuterie de la pendule, c'est-à-dire sous l'influence de l'interrupteur, constitué par la bascule B et le doigt D.

En effet, le ressort R, en temps de repos, a forcément la position indiquée sur la figure. Or, si le contact de *e* avec D n'a pas lieu, les fermetures de courant, opérées en *s* par les oscillations rétrogrades du pendule, demeureront sans effet sur l'électro-aimant E', puisque le courant ne

pourra sortir du fil F et sera arrêté en R. Il n'en sera plus de même quand il y aura contact entre *e* et D, car le courant suivra alors le chemin FDCBF'KE'P ; la roue *r'* avancera donc d'une dent, chaque seconde, et la dent *d*, tombant dans une coche de la roue de compte, produira le contact de C et de K. Au même instant, celui de D avec *e* cessera ; mais le circuit pourra rester fermé, à travers l'électro-aimant E', par le chemin FCKF'E'P, jusqu'à ce que le rochet *r'*, à la suite d'une dernière impulsion de cet électro-aimant, ait soulevé la dent *d* sur un nouveau cran. Or, tout le temps que cette dent sera restée dans une coche, les fermetures de courant, produites en *s*, seront traduites sur la sonnerie par des coups frappés sur le timbre, et le nombre de ces coups sera le même que celui des dents du rochet *r'*, comprises entre les deux crans de la roue de compte, dans l'intervalle desquels est tombée la dent *d*. On comprend, d'après cela, que si cette roue est divisée en coches de longueurs convenables, pour correspondre aux heures et aux demi-heures, on aura réalisé une sonnerie à distance, qui jouera exactement le rôle d'une sonnerie d'horloge ordinaire.

Régulateur des horloges de M. Bréguet. — Pour éviter les irrégularités, qui peuvent se produire dans la marche des compteurs électro-magnétiques, par suite d'un mauvais entretien de la pile, de contacts altérés ou d'accidents survenus dans les conducteurs, M. Steinheil d'abord et M. Bain ensuite avaient imaginé de borner le rôle de l'électricité, dans l'horlogerie, au réglage des horloges ordinaires ; mais leur système, bien que d'une très-grande simplicité, ne présentait pas assez de sécurité et ne fournissait pas de résultats assez précis, pour qu'on pût lui accorder une grande confiance. La question a été reprise, dans ces derniers temps, par M. Bréguet, qui est arrivé à la résoudre de la manière la plus satisfaisante, au moyen d'un dispositif très-ingénieux, applicable à toutes les horloges.

Le mécanisme additionnel de ce dispositif, appliqué à une sonnerie de pendule ordinaire avec sa minuterie, est représenté *fig.* 1, Pl. X. Sur l'axe creux de l'aiguille des minutes, et sous le cadran, se trouve calé un bras B, terminé en pointe, dont la position correspond à celle de l'aiguille des minutes elle-même. Au-dessus de la minuterie, se trouvent disposées deux roues, de même rayon, R, R', qui engrènent ensemble et qui sont munies de deux chevilles *c*, *c'*, occupant des positions symétriques. Par suite de cette symétrie, ces chevilles se trouvent en regard l'une de l'autre, lorsqu'elles arrivent sur la ligne des centres. Les deux roues R et R' reçoivent leur mouvement du mécanisme de la sonnerie, par l'intermédiaire d'une roue, qui est montée sur l'axe de R et qui est en rapport avec le deuxième mobile de la sonnerie.

Les fonctions de cette sonnerie sont supprimées, et son mécanisme est, comme on le voit, utilisé pour l'opération du réglage ; la roue de compte peut servir pour le déclanchage. A cet effet, elle porte 3, 4 ou 6 entailles,

suivant le rapport de la roue intermédiaire *r* avec les roues R et R′ et celui du pignon de cette roue *r* avec la roue *r′*, qui commande le mouvement du chaperon. Il est évident que l'intervalle de ces entailles doit correspondre exactement à un tour complet des roues R et R′.

Au levier de la détente D de la sonnerie est adaptée une armature en fer doux A, maintenue par un ressort antagoniste et un butoir d'arrêt; au-dessous de cette armature se trouve un électro-aimant E.

Quant au jeu de ce mécanisme, il est facile à comprendre. Si l'on suppose que l'horloge régulatrice ferme, toutes les douze heures, un courant traversant l'électro-aimant E, l'armature A sera attirée et le déclanchage du chaperon aura lieu, aussi bien que celui de la roue des délais; le mécanisme de la sonnerie sera mis en mouvement et les roues R et R′ feront un tour entier dans le sens des flèches. Si l'horloge à régler se trouve en avance ou en retard, le bras B, qui suit l'aiguille des minutes, se trouvera à gauche ou à droite de la verticale; mais alors l'une ou l'autre des chevilles *c*, *c′* rencontrera ce bras et le ramènera à la position verticale, sans qu'il puisse y avoir la moindre déviation, puisqu'en arrivant à la ligne des centres, les deux chevilles tendent toutes les deux à le maintenir dans cette position.

L'aiguille des minutes se trouve donc ainsi ramenée à la verticale, c'est-à-dire à midi. On pourrait, d'ailleurs, régler sur toute autre heure; il suffirait, pour cela, de caler le bras B, par rapport à l'aiguille des minutes, de telle sorte que l'angle formé par leurs deux axes fût exactement celui donné par la différence entre l'heure choisie et celle de midi.

Pourvu que la durée de la fermeture du courant, qui détermine la mise en mouvement du mécanisme, soit inférieure à celle de la rotation d'un tour des roues R et R′, l'action de l'électro-aimant pourra être plus ou moins prolongée, sans inconvénient; car, une fois sortie d'une entaille, la détente D ne peut plus arrêter les rouages que lorsqu'elle rencontre l'entaille suivante; or, c'est en ce moment-là précisément que se trouve achevée la rotation des roues R et R′.

Dans la disposition que nous venons d'indiquer, le champ, dans lequel l'aiguille des minutes est susceptible d'être ramenée à l'heure, est assez restreint et ne comporte pas un retard ou une avance de plus de 15 minutes. Du reste, un pareil écart ne pourrait guère se produire, en 12 heures, qu'avec une horloge très-mauvaise ou bien mal réglée. Ce n'est donc que dans des cas très-particuliers, où le réglage s'effectue à des époques très-irrégulières, qu'il peut y avoir intérêt à donner plus de champ à la correction. Ce problème a été résolu, mais nous jugeons inutile d'indiquer cette solution, qui ne présente pratiquement qu'un faible intérêt.

Nous nous bornerons donc, pour compléter notre description, à l'indication du moyen employé par M. Bréguet pour régler également l'aiguille

des heures. On comprend que si l'on ne réglait que l'aiguille des minutes, il pourrait arriver qu'au bout d'un certain nombre de corrections, effectuées dans le même sens, l'heure indiquée par l'aiguille des heures différât de l'heure véritable. Pour effectuer cette nouvelle correction, M. Bréguet a adapté simplement, sur le canon de l'aiguille des heures, un second bras B', qui se trouve ramené à la verticale, en même temps que l'autre bras, par les chevilles *c* et *c'*.

Par suite de l'agencement des aiguilles indicatrices sur leurs canons respectifs, les deux bras additionnels se trouvent placés, l'un en avant, l'autre en arrière de la minuterie.

« On voit tout de suite, dit M. Bréguet, le grand avantage que présente ce système ; car, en supposant que l'électricité n'ait pas agi pour une cause quelconque, il en résulterait que les horloges marcheraient toujours, que rien ne serait arrêté et qu'il pourrait se faire seulement qu'elles fussent en avance ou en retard d'une ou de deux minutes. Mais on ne verrait jamais toutes les horloges arrêtées ou dérangées à la fois, comme cela arrive quelquefois avec les compteurs purement électriques. Les horloges étant réglées, d'ailleurs, comme à l'ordinaire, l'électricité pourrait ne pas remplir ses fonctions, pendant deux ou trois jours, sans inconvénient grave. »

Horloges électriques de M. Lasseau. — M. Lasseau, un des plus ardents promoteurs des applications de l'électricité à l'horlogerie, a installé dans plusieurs villes et, en particulier, dans celle de Montbéliard, un système complet d'horloges électriques, qui a donné les résultats les plus satisfaisants.

M. Lasseau s'est proposé de transmettre l'heure aux horloges principales de la ville, sans en changer le mécanisme, et de les remettre à l'heure d'un point central, où se trouve établi le régulateur. Il a trouvé la solution de cet important problème dans une combinaison très-habile du régulateur de M. Bréguet, que nous venons de décrire, et du système de distribution électrique de l'heure de M. Liais, ancien astronome de l'Observatoire de Paris.

L'installation, dans la ville de Montbéliard, comporte plusieurs appareils distincts :

1° Un régulateur électrique avec compteur, établi à l'hôtel de ville ;

2° Trois horloges à compteur électro-chronométrique ;

3° Des compteurs répétiteurs, avec accélérateurs et retardateurs.

Le régulateur électrique, représenté *fig.* 8, Pl. X, se compose d'un simple système à contre-poids et à pendule, analogue à celui de M. Froment, que nous avons précédemment décrit. La marche du pendule est entretenue par la chute de la lame L sur le bras courbe C, relié à la tige de ce pendule, chute qui se produit, lorsque ce bras rencontre la lame,

à la fin de l'oscillation. Cette rencontre donne, en effet, naissance à un courant, qui, en rendant actif l'électro-aimant E, détermine l'attraction de l'armature A et, par suite, l'abaissement de la tringle T, qui supporte la lame L.

Le compteur de ce régulateur fonctionne sous l'influence de deux électro-aimants E′, E″, entre lesquels oscille l'armature B, qui leur est commune. Cette armature, par le levier qui la termine, agit sur une fourchette X, dont le point d'articulation est en *o* et qui porte un double système de cliquets d'impulsion, destinés à actionner les deux roues à rochet Y, Y′. A chaque oscillation de l'armature B, à droite ou à gauche, l'une ou l'autre de ces roues échappe d'une dent.

Le mouvement oscillatoire de l'armature B est dû à l'interrupteur R, qui est soumis à l'action de l'armature A de l'électro-aimant E et qui renvoie alternativement le courant dans l'un ou l'autre des électro-aimants E′, E″, suivant que l'armature A est repoussée ou attirée.

Sur les axes des deux roues Y, Y′ sont montées deux autres roues, de même diamètre, engrenant ensemble, par l'intermédiaire desquelles le mouvement des deux premières se transmet à la minuterie, dont l'axe est indiqué en S sur la figure.

L'une de ces roues Y est utilisée pour le renvoi de l'heure dans les compteurs électro-chronométriques, établis en trois points de la ville. Dans ce but, sur l'une des faces de cette roue, se trouve adaptée une cheville, autour de laquelle sont disposés trois ressorts V, V′, V″, de telle sorte qu'ils puissent être rencontrés successivement par cette cheville, toutes les minutes. Avec cette disposition, l'heure ne se trouve pas transmise simultanément aux trois compteurs; mais, comme l'ordre de succession des contacts reste toujours le même, les horloges, qui se trouveraient en retard, par ce fait, de fractions de minutes, peuvent être avancées préalablement de ces quantités, de telle sorte que les heures indiquées soient exactement les mêmes partout.

La *fig.* 11, Pl. X, représente le mécanisme que M. Lasseau a ajouté aux horloges de clocher de la ville, pour les transformer en compteurs électro-chronométriques.

L'axe A de la roue d'échappement de l'horloge, dont l'ancre et le balancier sont enlevés, se prolonge et porte, à son extrémité, une roue de 50 dents, laquelle engrène, à la fois, avec un pignon, faisant tourner un volant à ailettes et avec une seconde roue I, servant de chaperon. Sur l'axe de cette roue est calé un excentrique, qui agit sur deux lames de ressort P, établies parallèlement, l'une à côté de l'autre, et constituant un interrupteur. Un électro-aimant E agit, par l'intermédiaire de son armature K, sur un levier LR, soit directement, au moyen d'une saillie pénétrant entre deux dents de la roue I, soit indirectement, au moyen d'une tige H, qu'il pousse vers une tringle T, reliée au volant.

Pour chaque fermeture du courant opérée au régulateur, la détente se trouve soulevée, le rouage défile et l'aiguille des minutes marche sur le cadran. Comme ce mouvement pourrait n'être pas parfaitement régulier, un rhéotome (*), disposé sur l'un des mobiles de l'horloge, coupe le courant, en temps opportun, pour arrêter le volant, au moment où l'aiguille est arrivée sur la minute qu'elle doit désigner.

L'interrupteur P a pour fonction de fermer un courant, à travers un compteur-répétiteur (qui correspond à l'horloge), toutes les minutes, c'est-à-dire à chaque tour de la roue I.

Ce compteur-répétiteur, destiné à fournir au poste central l'heure de l'horloge à laquelle il est lié, est un compteur ordinaire, représenté *fig.* 9, Pl. X.

A côté de lui, se trouvent un conjoncteur et un disjoncteur de courant, qui permettent, l'un de fournir à la main plusieurs fermetures précipitées, afin d'avancer l'horloge, lorsque le répétiteur indique qu'elle est en retard, l'autre d'interrompre le courant, quand, au contraire, le répétiteur indique une avance. Dans l'installation de Montbéliard, ces répétiteurs, au nombre de trois, sont adaptés à la partie inférieure du régulateur.

L'idée des répétiteurs appartient à M. Liais, qui, le premier, en a établi un certain nombre à l'Observatoire de Paris.

Sonnerie électrique de M. Fournier. — Le travail mécanique, développé par l'électricité, ne pouvant s'obtenir qu'au moyen d'une dépense relativement élevée, nous avons dit qu'il convenait de limiter le rôle de cet agent à la production d'actions mécaniques très-faibles. S'il s'agit, par exemple, comme dans les sonneries, de faire frapper un marteau sur une cloche, on devra, par motif d'économie, faire mouvoir ce marteau par l'action d'un poids, retenu par un obstacle, et n'utiliser l'électricité que pour dégager cet obstacle au moment convenable.

C'est le principe qui a été réalisé dans les cloches d'alarme, installées par M. Reinard dans plusieurs villes des États-Unis et destinées à prévenir, sur un grand nombre de points, de la première apparition des incendies.

A l'aide d'une disposition analogue à celle de M. Reinard, M. Fournier (**) est arrivé a établir de nouvelles sonneries, qui, quels que soient la grandeur des cloches et leur éloignement, peuvent être mises en jeu par une horloge de petites dimensions.

(*) En physique, on désigne, sous le nom de *rhéotome*, un organe accessoire des appareils électromagnétiques, qui a pour objet de fermer ou de rompre automatiquement le courant, en temps opportun, pour produire des effets déterminés.

(**) La sonnerie électrique de M. Fournier a été présentée à la Société d'Encouragement et a fait, en janvier 1870, l'objet d'un rapport très-favorable de MM. Tresca et Bréguet, auquel se trouve empruntée, en partie, la description de l'appareil donnée dans le texte.

Disons, de suite, que cette horloge ne sert qu'à faire mouvoir un cylindre commutateur, destiné à établir ou à rompre la communication électrique. Ce cylindre d'ivoire tourne comme la roue de compte ordinaire de la sonnerie.

Le récepteur du courant est un appareil formé d'une roue mobile, sous l'action d'un contre-poids et qui peut être arrêtée par des cliquets. Lorsque l'électricité, en produisant le déplacement d'un cliquet, rend libre la roue à rochet correspondante, le contre-poids fait fonctionner l'arbre, qui porte un des marteaux, et commande toutes les manœuvres nécessaires pour la préparation du coup suivant.

Les Figures de la Planche XI représentent les principaux détails de la sonnerie de M. Fournier.

Appareil récepteur. — L'appareil récepteur se compose de trois parties bien distinctes : *la roue d'engrenage* A, qui sert de moteur à tout l'appareil, *les transmissions* qui font marcher le marteau des quarts, et les *transmissions* analogues qui agissent sur le marteau des heures.

L'ensemble de la transmission d'un marteau comprend deux cliquets, une chape à levier, qui les réunit, et une bielle, agissant sur le levier de commande du marteau.

Pour le marteau des quarts (*fig.* 1 et 3), la transmission se compose des cliquets D et E, du levier G, de la bielle O et du levier P, qui commande l'axe Q, sur lequel est fixé le marteau R.

Les organes analogues, pour le marteau des heures (*fig.* 1, 5 et 6), sont les cliquets B et C, le levier F, la bielle S et le levier T, qui commande l'axe U du marteau V.

Si l'on suppose que les cliquets D et E des quarts soient disposés pour fonctionner, comme l'indique la *fig.* 1, le cliquet D, étant en prise avec l'une des dents de la roue A, se trouve poussé par cette dent, jusqu'à ce que le marteau R ait fait un demi-mouvement.

Pendant ce temps, le cliquet E monte sur la goupille *e* et vient s'engager sous une dent de la roue A. Mais, quand le marteau R frappe sur la cloche, il se produit un léger mouvement de recul, qui permet au cliquet D de se dégager par son propre poids ; le cliquet E, resté seul en prise, est poussé par la roue A et ramène le marteau dans sa première position ; en frappant l'autre cloche des quarts, ce marteau dégage le cliquet E et laisse le cliquet D en prise.

Pour plus de clarté, nous allons décrire séparément le débrayage de l'appareil et la mise en prise du marteau des quarts et de celui des heures.

L'appareil est réuni, au moyen de deux fils, à l'horloge, qui a pour fonction d'établir une communication électrique, chaque fois qu'il y a un coup à sonner. Par le passage d'un courant, à travers les fils des bobines N et N',

l'armature intérieure s'aimante et attire la pièce M; le levier J s'échappe et s'abaisse sous l'action du poids X. La goupille *j*, fixée à l'extrémité du bras courbe de ce levier, vient alors agir sur le levier K, le repousse et dégage la pièce à trois branches LI, qui tourne autour de son axe sous l'action du ressort Y. Le cliquet *i*, que porte la pièce LI et qui maintenait le levier G, dégage en même temps ce levier, qui obéit alors à l'action de la roue A, transmise par le cliquet D, et fait faire au marteau R une demi-course. Par suite du petit mouvement de recul produit par le choc, le cliquet D tombe, tandis que le cliquet E s'engage et ramène le marteau dans sa première position.

Pendant tous ces mouvements, le levier J a été remis en place, afin de pouvoir de nouveau débrayer l'appareil. A cet effet, le levier G porte une goupille *k*, destinée à limiter le mouvement de la pièce LI; lorsque le levier G descend, la goupille agit sur la partie courbe de cette pièce, la repousse et, par l'intermédiaire de la branche L', remet en place les deux leviers K et J.

La petite goupille *x*, fixée à l'extrémité du levier J, vient agir sur l'appendice courbe de la pièce M, pour décoller l'armature et s'opposer à l'action du magnétisme rémanent (*).

La chape des cliquets des quarts D et E porte en *a* le point de commande du cliquet A', qui a pour fonction de substituer le marteau des heures à celui des quarts. Ce cliquet agit sur une roue à chaperon, qui porte 10 dents, c'est-à-dire un nombre égal à celui des quarts à sonner dans une heure, et qui, par suite, à chaque quart sonné, tourne d'une dent. Au bout de dix coups, une goupille B', fixée sur ce chaperon, en agissant sur un plan incliné C', force la pièce D'E' à tourner autour du point d'oscillation *c*; cette pièce porte deux goupilles *b* et *d*, qui la suivent dans ce mouvement; la goupille *b* entraîne avec elle le cliquet B et l'amène sous une dent de la roue A; en même temps, le petit mouvement de recul, produit par le dernier coup des quarts, permet au cliquet D de s'échapper et de venir reposer sur la goupille *d*. La sonnerie des quarts est alors complétement débrayée et la sonnerie des heures prête à fonctionner.

Dans la rotation de la pièce D'E' autour de son centre *c*, l'extrémité E' se déplace de bas en haut. En ce point est articulée une bielle F', agissant sur un levier G'H', qui a pour fonction de déplacer longitudinalement, par l'intermédiaire de la goupille I', la pièce J et les goupilles *j*, *j''*, de telle sorte que, lorsque l'armature M est attirée, la goupille *j'''*, placée sur le prolongement de *j*, vienne pousser le levier K', qui se trouve en arrière de K. Ce levier K' dégage à son tour la pièce $L_1L'_1I_1$. Cette dernière

(*) Le magnétisme rémanent paraît devoir être attribué à la présence d'une très-petite quantité de carbone, que conserve presque toujours le fer, même le plus pur.

pièce porte un petit cliquet i', qui fonctionne comme celui des quarts et sert à maintenir le levier F, dont la goupille k' a pour fonction de remettre l'appareil de débrayage dans son premier état.

Le fonctionnement des cliquets et du marteau V des heures est identique à celui des organes correspondants de la sonnerie des quarts. A chaque coup de ce marteau V, un cliquet V' fait tourner d'une dent un chaperon, armé de 78 dents, chiffre qui représente le nombre total des coups à sonner en douze heures.

Ce chaperon porte douze goupilles, qui ont toutes pour fonction de rembrayer, à chaque heure, les cliquets des quarts. Ces goupilles agissent successivement, par l'intermédiaire du petit plan incliné $x'y'$, sur la pièce D'E' et la remettent en place. L'extrémité E', en revenant à sa première position, y ramène également, comme nous l'avons vu, la pièce J et les goupilles j, j', j'', j'''. Sur la *fig.* 1 se trouve représentée une chaîne Z, destinée à recevoir un poids, qui doit être déterminé d'après les poids des marteaux et ceux des cloches.

Pour que l'appareil puisse être remonté, le cliquet D doit être en prise, car la goupille d est fixée sur une petite pièce mobile, qui permet à la roue A de tourner en sens contraire de sa marche normale et fait servir le cliquet D comme cliquet de retenue. La roue A engrène avec une roue à lanterne, dont l'axe se termine par deux carrés, destinés à recevoir les manivelles pour le remontage.

Pour mettre les chaperons d'accord et faciliter la surveillance, l'appareil est muni de deux index, l'un R', fixé sur le bâti, l'autre U' sur le cliquet V' de la sonnerie des heures.

D'après la description qui précède, on voit qu'au moment où le courant passe, la sonnerie des quarts est déclanchée ; le poids moteur de la sonnerie, devenu libre, soulève le marteau, qui frappe successivement les huit coups des quatre quarts, puis il replace les organes de manière à ce que tout soit prêt pour sonner le nombre des coups de l'heure. Cette seconde opération terminée, les cliquets se placent d'eux-mêmes dans la position convenable pour que le premier quart soit sonné au prochain contact.

La complication de la plupart des organes préparatoires tient à ce que l'inventeur a voulu conserver le même appareil pour sonner les heures et les quarts, tandis qu'il aurait pu employer deux appareils distincts, à la condition de placer, sur l'arbre de la roue de compte, un double commutateur, avec touches spéciales pour l'appareil des heures et celui des quarts. Les raisons, pour lesquelles il n'a pas cru devoir adopter cette dernière solution, sont les suivantes :

1° L'emploi de deux sonneries distinctes exigerait deux poids moteurs, deux électro-aimants et deux séries d'organes de déclanchement ;

2° Il y aurait lieu de craindre que, par le moindre retard dans le contact, les quatre quarts ne vinssent à sonner en même temps que l'heure;

3° A chaque remise à l'heure, il faudrait opérer d'une manière distincte sur chacun des appareils;

4° Enfin l'inconvénient le plus grave consisterait dans les grandes dimensions du commutateur, qu'il faudrait ajouter à l'horloge pour les quarts. Le nombre des contacts du cylindre devrait être, en effet, égal au nombre des quarts à sonner dans une journée, tandis que, dans la disposition adoptée, un cylindre à six contacts par tour est suffisant.

Les *fig.* 5 et 6 représentent la disposition des marteaux et celle des ressorts, destinés à amortir les chocs en retour. Au moyen de ces figures et de la *fig.* 1, il est facile de se rendre compte de l'action des mouvements de sonnette, qui ont pour résultat de jeter, contre les ressorts, les marteaux, qui sont ensuite lancés, en sens contraire, contre les cloches et viennent frapper sur elles, exactement comme le fait un forgeron sur une enclume. Ce n'est donc pas par le poids seul des marteaux que les coups sont sonnés, comme cela a généralement lieu dans les autres systèmes de sonneries, et il en résulte qu'on peut restreindre notablement le poids de ces marteaux, ainsi que la force nécessaire pour les mettre en jeu.

Appareil additionnel de l'horloge. — Il nous reste à indiquer l'appareil dont il faut munir l'horloge, chargée d'établir la communication, lorsque la sonnerie doit fonctionner. Cet appareil, représenté *fig.* 4, est placé sous l'horloge et relié à la détente de la sonnerie de cette horloge par une petite tringle agissant sur la boucle A, qui est fixée à une pièce ABC. L'appareil additionnel comprend trois mobiles, D, E et F. Le premier est le mobile moteur, le second n'est qu'un intermédiaire, et le troisième porte un tambour d'ivoire, F', dont la circonférence est divisée par six goupilles de platine. Ces goupilles, au lieu d'agir sur la queue des marteaux, comme dans une sonnerie ordinaire, exercent leur action successivement sur les deux lames flexibles G et G'. Chaque fois que l'une des goupilles vient toucher ces lames, le circuit IGG'J se trouve fermé et, comme les fils I et J communiquent avec les fils des bobines N et N', on voit que chaque contact a pour résultat de faire frapper un coup à la grosse sonnerie, établie à une distance plus ou moins considérable.

L'embrayage de l'appareil est produit par une goupille *a*, fixée sur une petite roue intermédiaire E' et qui vient buter contre une autre goupille *b*, que porte la pièce ABC.

Lorsqu'on soulève cette dernière pièce, la goupille *b* laisse passer la goupille *a*, et tout l'appareil se met en mouvement, sous l'action d'un poids spécial, attaché au bout de la corde H. Le doigt K étant soulevé par la roue à empreintes R, fixée sur le troisième mobile F, permet au chaperon S de fonctionner, comme dans une sonnerie ordinaire; pour un

quart, il fait passer, sous les lames G, G′, une goupille de la roue F′, pour deux quarts, deux goupilles, etc.

La marche de l'appareil est régularisée par un petit volant, dont l'axe engrène, au moyen d'une roue d'angle, avec la roue E′, et dont les ailettes mobiles tendent toujours à se placer obliquement.

Pour faire sonner les heures avec plus de lenteur que les quarts, on a ménagé, sur le chaperon S, des parties plus saillantes que celles des quarts et qui ont pour objet de relever davantage le levier T; ce levier vient agir sur la bague *d* du modérateur et, par l'intermédiaire des bielles *e* et *f* et des petits leviers *g* et *h*, redresse les ailettes *i* et *j*, de manière que tout l'appareil ne marche plus qu'avec une vitesse moindre.

Le petit levier *kl* sert à lever les lames G, G′, pour isoler la grosse sonnerie; à l'extrémité *l* est fixée une goupille de platine, pour établir la communication entre les deux lames. Cette communication peut servir, d'ailleurs, à remettre la grosse sonnerie d'accord avec l'horloge.

Résumé et conclusions. — L'appareil de sonnerie de M. Fournier fournit, comme on le voit, une solution nouvelle et originale du problème de la sonnerie des horloges. Tout en n'exerçant aucune influence sur la régularité de la marche, cette solution est applicable aux cloches des plus grandes dimensions, sans qu'il soit, pour cela, nécessaire d'augmenter celles de l'horloge elle-même. Il suffit de lui ajouter l'appareil du commutateur, pour obtenir les résultats qu'on ne pourrait réaliser, avec une sonnerie directe, qu'en employant un mécanisme de dimensions beaucoup plus considérables.

Cette solution a, d'ailleurs, le grand avantage de n'utiliser le courant électrique que comme moyen de déclanchement, c'est-à-dire dans les conditions que nous avons indiquées comme les meilleures, tout en permettant de placer la sonnerie à une distance quelconque de l'horloge, sans autre relation nécessaire que celle qui résulte du fil de transmission.

Un autre avantage de cette disposition, qui mérite d'être signalé, c'est qu'elle permet d'installer, dans tous les quartiers d'une ville, des sonneries mises en jeu par une horloge unique. Une installation de ce genre rendrait certainement de grands services dans les centres populeux, où des sonneries de nuit seraient beaucoup plus utiles, pour le réveil des ouvriers, que des cadrans éclairés. Au moyen d'un déclanchement facultatif, fait à la main, il serait, d'ailleurs, possible de mettre en jeu ces sonneries et de les utiliser ainsi, comme signaux d'alarme, en cas d'incendie.

Pour tous ces motifs, les appareils de M. Fournier constituent un des progrès les plus sérieux qui aient été réalisés dans ces dernières années. Ils sont probablement appelés à transformer l'horlogerie monumentale, en donnant à ses produits une plus grande certitude de résultats, en même temps qu'une notable économie dans la construction.

CHAPITRE IV.

APPLICATIONS DIVERSES.

TYPES D'HORLOGES MONUMENTALES.

HORLOGES DE M. COLLIN.

Dans ces dernières années, l'horlogerie monumentale a donné lieu à un grand nombre d'applications, dans lesquelles on rencontre des améliorations et des perfectionnements d'une certaine valeur. Nous avons déjà signalé, pour les échappements, les habiles combinaisons de MM. Dent, H. Lepaute et P. Garnier. Mais les innovations les plus importantes, dans ces horloges, sont celles qui se rapportent à la transmission de l'heure par l'électricité.

Comme type de ces innovations, nous décrirons l'horloge monumentale de M. Collin, qui figurait à l'Exposition de 1867 et qui a été exécutée pour un certain nombre d'édifices de la ville de Paris, parmi lesquels nous citerons Notre-Dame, Saint-Germain-l'Auxerrois, la Trinité, etc.

Cette horloge est représentée *fig.* 1 (Pl. XIV). Son échappement est à chevilles, avec remontoir d'égalité, et son pendule compensateur est à tiges de fer et de zinc, d'après le système de Harrisson. Les détails, dans lesquels nous sommes entré précédemment, sur ces divers organes, nous dispensent de les décrire, ainsi que ceux du rouage proprement dit.

Les innovations réellement intéressantes et sur lesquelles nous croyons devoir appeler l'attention, sont :

1° Une remise à l'heure électrique (*fig.* 2) ; 2° une transmission électrique (*fig.* 4); 3° une transmission par ondulation de l'air (*fig.* 3).

Remise à l'heure électrique. — Ce système de remise à l'heure a pour but de réaliser, à peu de frais, l'unification de l'heure dans les villes, en conservant les horloges existantes. Ce but, comme on le voit, est le même que celui poursuivi par M. Lasseau, mais il est atteint par des dispositions différentes.

Dans le système de M. Collin, un courant électrique passe par l'horloge-type et par celles qu'il s'agit de régler. Sur la roue d'échappement de ces dernières, est adapté un rochet, dans lequel vient s'engager un levier, mis en mouvement par un électro-aimant.

Pour que l'horloge-type remette à l'heure plusieurs horloges, une ou deux fois par jour, il est nécessaire que celles-ci soient en avance, sur la première, de quelques secondes. En temps normal, le courant électrique est coupé entre l'horloge-type et celles à régler. Cinq minutes environ avant le réglage, l'horloge-type ferme le circuit pour ce qui la concerne, tandis qu'il reste encore ouvert dans les autres horloges; mais, quelques secondes avant l'heure choisie pour le réglage, ces horloges complètent le courant; sous l'action des électro-aimants, les leviers entrent en activité et arrêtent les roues d'échappement, tout en laissant osciller les pendules. L'attraction de chaque levier a lieu, lorsque le cadran correspondant marque l'heure du réglage; elle se produit donc *simultanément*, pour tous les leviers, ou *successivement*, si la marche des horloges est différente.

Lorsque l'horloge-type, qui, comme nous l'avons dit, est légèrement en retard sur les autres, arrive à l'heure, elle coupe le courant; toutes les roues d'échappement redeviennent libres instantanément, et les horloges réglées reprennent leur marche.

Comme un courant électrique, qui ne fonctionne qu'à de longs intervalles, n'exige qu'une faible quantité d'électricité, le système de remise à l'heure n'entraîne qu'une dépense insignifiante.

Transmission électrique de l'heure. — Le système de transmission électrique permet, comme nous l'avons vu, de faire marquer l'heure simultanément sur un grand nombre de cadrans, à l'aide d'un seul régulateur.

La disposition adoptée par M. Collin est très-simple et n'entraîne qu'une faible dépense d'électricité, lorsque la transmission n'est pas continue et n'a lieu, par exemple, que tous les quarts de minute, ce qui est, en général, bien suffisant.

Dans ce système, chaque cadran récepteur se compose d'une minuterie, à laquelle est adapté un rochet, dont le cliquet est commandé par un levier, que fait mouvoir un électro-aimant; ce cliquet est, d'ailleurs, disposé de manière à ne laisser passer chaque fois qu'une seule dent.

L'électro-aimant n'agit pas directement sur le levier; il a uniquement pour fonction de tendre un ressort à boudin; lorsque le courant est interrompu, ce ressort se trouve abandonné à lui-même et, en se détendant, agit sur le levier, qui porte le cliquet. Ce mode de commande offre le grand avantage que le ressort agit sur le rochet avec son maximum de tension, précisément lorsqu'il a à vaincre l'inertie de la minuterie, et, comme l'énergie de ce ressort diminue graduellement, à mesure qu'il se rapproche de la fin de la course, on évite ainsi le tremblement qui se produit, dans les aiguilles, avec le mode de commande directe.

Transmission de l'heure par ondulation de l'air. — Le système de transmission de l'heure par ondulation de l'air est une innovation remarquable,

qui peut être avantageusement utilisée dans un assez grand nombre de circonstances. Le dispositif, employé par M. Collin, pour réaliser ce mode de transmission, consiste essentiellement en deux corps de pompe, de diamètres différents, dans lesquels s'engagent librement deux pistons, qui ont une longueur égale à vingt fois leur course environ. Ces deux corps de pompe, qui sont reliés par un tube, d'une longueur plus ou moins considérable, sont établis, le plus grand, sur l'horloge régulatrice, le plus petit, près du cadran récepteur; le premier est fixe, le second mobile.

Les pistons se mouvant librement dans les corps de pompe, leur action se réduit à la production d'une ondulation, dans la colonne gazeuze qui les réunit, en vertu d'un déplacement brusque et très-court du plus gros de ces pistons. Le mouvement transmis est la résultante du double mouvement d'ascension et de descente du piston moteur.

La tige de ce piston est reliée à un excentrique, mû par le remontoir d'égalité de l'horloge régulatrice, et le corps de pompe du petit piston est articulé avec la minuterie du cadran récepteur. A certains intervalles, toutes les vingt secondes, par exemple, l'horloge soulève brusquement le gros piston et le laisse retomber; l'ébranlement de la colonne d'air produit des déplacements du même genre, pour le corps de pompe récepteur, qui est mobile, et, comme chacun des mouvements d'ascension et de descente de ce corps de pompe peut faire avancer l'aiguille de dix secondes, on obtient, en réalité, pour cette aiguille, un déplacement total de vingt secondes.

Le soulèvement du petit corps de pompe communique le mouvement aux aiguilles, par l'intermédiaire d'une bielle et d'un simple encliquetage.

Pour fonctionner dans de bonnes conditions, ce système exige, entre les diamètres des pistons et celui du tube de communication, un certain rapport, qui varie avec la distance de l'horloge au cadran récepteur et avec la résistance de la minuterie. Ce rapport ne peut guère être déterminé que par tâtonnements. Ainsi, par exemple, à Notre-Dame de Paris, où l'horloge se trouvait à 100 mètres du cadran de l'orgue, qui a $1^m,20$ de diamètre, M. Collin a reconnu, après de nombreux essais, que, pour la transmission du mouvement, les organes les plus convenables étaient les suivants : un piston moteur, de $0^m,20$ de diamètre, de $0^m,10$ de hauteur et de $0^m,005$ de course; un piston récepteur de $0^m,04$ de diamètre et, enfin, un tube de communication de $0^m,006$ de diamètre seulement.

Nouveau système de carillon. — A l'origine, les carillons, installés dans quelques églises, fonctionnaient à la main. Le mouvement était donné aux divers battants des cloches par l'intermédiaire de leviers et de pédales, qui, par leur réunion, formaient une espèce de clavier, sur lequel manœuvrait le carillonneur. Plus tard, les carillons fonctionnèrent automatique-

ment, et, aujourd'hui encore, ils sont mis en jeu, au moyen de cylindres, mus par des rouages, que détend une horloge. La disposition de ce mécanisme présente la plus grande analogie avec celle du mécanisme des boîtes à musique. Ce dernier consiste essentiellement, comme on le sait, en un cylindre de cuivre, armé de pointes nombreuses, qu'un mouvement d'horlogerie fait tourner lentement, autour de son axe. Les pointes, suivant leurs positions sur le cylindre, soulèvent successivement et simultanément des lames vibrantes, de manière à produire des airs et des accords.

Dans les carillons, le cylindre mobile, au lieu de pointes, porte des dents, destinées à soulever de lourds marteaux, frappant sur des cloches, qui rendent les différentes notes de la gamme. Ce cylindre est mû par des rouages, que détend l'horloge, à toutes les heures et même, pour certains carillons, à tous les quarts d'heure; de là la nécessité de donner à ce cylindre des dimensions considérables. Celui du carillon de Dunkerque a 1 mètre de diamètre. Celui de Bruges a 2 mètres; il est en bronze et ne pèse pas moins de 10.000 kilogrammes.

« Dès lors, on conçoit, dit M. Collin, que, pour mouvoir ces monstrueuses machines, il faille des poids moteurs variant de 500 à 3.000 kilogrammes, suspendus à des chaînes, qu'on enroule sur des tambours, au moyen de treuils, qui demandent d'un à trois hommes et d'une heure à trois heures pour être remontées. »

Frappé de ces inconvénients, M. Collin a cherché à les éviter, et la disposition, qu'il a imaginée, pour le nouveau carillon de la tour Saint-Germain-l'Auxerrois, est infiniment plus simple. Ce nouveau système, qui est représenté *fig.* 5 et 6 (Pl. XIV), n'a que quatre cloches et, par suite, quatre rouages; il possède, en outre, un clavier ordinaire, un clavier électrique, puis un cylindre automoteur.

Les innovations les plus importantes consistent : 1° dans l'emploi d'un rouage spécial pour chaque cloche et proportionné à son poids; 2° dans le déclanchement de ces rouages, qui ont pour fonction de lever les marteaux, au nombre de quatre sur chaque cloche; ces marteaux s'engagent, l'un après l'autre, dans un arrêt, où ils restent suspendus, de telle sorte que, pour les déclancher, l'ergot du cylindre n'a d'autre effort à vaincre qu'un léger frottement.

Une fois déclanchés, ces marteaux tombent instantanément et répètent la note assez vivement, pour pouvoir jouer, au besoin, des doubles et même des triples croches, ce qui, d'ailleurs, est inutile avec les cloches. C'est au moment même où le doigt déclanche le marteau que le rouage est débrayé, pour préparer un nouveau marteau et le mettre à la disposition du doigt du cylindre, en cas de répétition de notes.

La différence entre les anciens systèmes et celui de M. Collin consiste donc à ne pas faire lever directement le marteau et à se servir d'un

rouage intermédiaire entre le levier et la touche, ce qui rend l'effort extrêmement faible.

Un autre avantage, c'est qu'au lieu de cylindres de 2 mètres de diamètre, on n'a plus besoin que de cylindres dix fois plus petits, c'est-à-dire de $0^{m},20$ seulement. Comme ces cylindres ne coûtent guère que la centième partie des anciens cylindres, ils peuvent être facilement changés, ce qui permet de faire jouer au carillon tel air nouveau qu'on juge convenable.

Enfin, comme les efforts à produire sont très-faibles, on se trouve dans les meilleures conditions pour l'emploi de l'électricité. Avec une transmission électrique, on pourrait, de l'orgue de l'église Saint-Germain-l'Auxerrois, faire des répétitions de cloches, ce qui constituerait des effets d'un genre tout nouveau.

HORLOGES DE M. DETOUCHE.

Horloge du Conservatoire. — La *fig.* 1 (Pl. XV) représente l'horloge construite par M. Detouche, pour le Conservatoire des Arts et Métiers.

Cette horloge, dont les formes sont très-élégantes, est à remontoir d'égalité, fonctionnant toutes les dix secondes. Le remontoir est destiné, comme on le sait, à soustraire l'échappement à l'influence des frottements qui se produisent dans les premiers mobiles du rouage et par la transmission du mouvement à un cadran extérieur, de $1^{m},30$ de diamètre, installé à 55 mètres de l'horloge; l'emploi de ce remontoir a permis de réduire à 10 grammes seulement le poids qui agit directement sur l'échappement.

L'échappement adopté est celui de Graham, avec levées en pierre. Le pendule est à compensation à leviers. La tige centrale, qui est en acier, porte, à son extrémité inférieure, au centre de la lentille, une pièce sur laquelle sont montés, à droite et à gauche, deux leviers, dont les parties extérieures servent d'appui aux deux tiges latérales du pendule, qui sont en laiton. Lorsque ces tiges s'allongent, par suite de l'élévation de la température, elles agissent sur les leviers et font remonter la lentille exactement de la quantité dont l'a fait descendre la dilatation de la tige centrale. Les coefficients de dilatation des tiges n'ayant pas un rapport rigoureusement constant, par suite du défaut d'homogénéité des métaux qui les composent, il est nécessaire de pouvoir faire varier la longueur jusqu'à ce qu'on soit arrivé à une compensation parfaite; c'est dans ce but qu'on a muni les leviers de deux vis de rappel.

La sonnerie de cette horloge répète, sans l'addition d'aucun rouage, l'heure à chaque quart, mais pour les heures de nuit seulement, c'est-à-dire de 8 heures du soir à 8 heures du matin. A cet effet, sur un même axe, sont montés cinq disques compteurs, dont le développement total correspond au nombre de coups (390) à frapper en 24 heures; à l'aide

d'un déclic très-simple, que ces disques mettent eux-mêmes en jeu, la broche d'arrêt de sonnerie passe successivement, à chaque révolution, d'un disque sur un autre, jusqu'au cinquième, et vient d'elle-même se rembrayer sur le premier disque, après cinq révolutions complètes.

La transmission au cadran, situé à 55 mètres, est établie au moyen d'une série de tiges en fer creux, aux extrémités desquelles sont ajustés des tampons en acier trempé et poli, reposant sur des galets en cuivre parfaitement tournés et roulant eux-mêmes autour d'axes en acier. Les tiges sont assemblées entre elles au moyen de pièces de dilatation, qui leur permettent de s'allonger ou de se raccourcir par les changements de température, sans nuire en rien à la marche de l'horloge.

Second type d'horloge monumentale. — La *fig.* 2 (Pl. XV) représente un autre type d'horloge, sonnant les heures, les demi-heures et les doubles quarts.

Ce type, qui, par l'aspect, diffère essentiellement du précédent, est muni, comme lui, d'un pendule compensateur à leviers. L'échappement est à chevilles. De chaque côté du tambour moteur sont établis deux leviers, destinés à donner l'impulsion, à droite, au mécanisme de sonnerie des heures, à gauche, à celui de la sonnerie des demi-heures et des doubles quarts.

MONTRES A REMONTOIR AU PENDANT.

Généralités. — Le problème de la suppression de la clef, pour le remontage et la mise à l'heure des montres, a, depuis longtemps, attiré l'attention des artistes. Beaumarchais, qui, avant d'embrasser la carrière du théâtre, avait exercé la profession d'horloger, comme son père, paraît être le premier qui ait résolu, en partie, ce problème, dans une montre dont le remontage s'opérait, en tournant, avec l'ongle, un anneau ajusté autour du cadran. Plusieurs années après, Lépine construisit une montre, dont le moteur s'armait, en enfonçant, plusieurs fois de suite, un poussoir, auquel on donnait préalablement, chaque fois, une rotation d'un quart de tour.

Mais ces inventions ne constituaient, à vrai dire, que de simples curiosités, et elles ne donnèrent lieu à aucune application.

Dans ces dernières années, la question a été reprise par un grand nombre de constructeurs et l'on a proposé une foule de combinaisons, qui permettent d'effectuer le remontage et la mise à l'heure, au moyen d'un mécanisme additionnel, dont l'organe principal se trouve logé dans le corps du pendant de la boîte de la montre.

Nous nous bornerons à décrire quelques-unes des dispositions les plus répandues, en renvoyant, pour les autres, à l'excellente brochure inti-

tulée *les Montres sans clefs*, qui a été publiée par M. A. Philippe, l'un des directeurs de la grande maison Patek et Philippe, de Genève.

Remontoir au pendant dit Lecoultre. — Ce système, qui est représenté *fig.* 6 et 7 (Pl. XII), est désigné, dans le commerce, sous le nom de *remontoir Lecoultre*, bien que sa disposition, d'après M. Saunier, paraisse devoir être attribuée, pour la plus grande partie, à M. Audemars. C'est le système de remontoir le plus généralement employé.

L'axe du remontoir, qui est représenté isolément en *a'a'*, à droite de la figure, est vu en place, avec ses divers accessoires, en *aa* (*fig.* 6). Une gorge, pratiquée sur son contour et dans laquelle s'engage la bride *cc*, empêche tout mouvement de recul. Au-dessous de cette gorge, et sur la partie cylindrique, est monté, à frottement libre, le pignon de remontage *b*, dont le canon, terminé par une denture à rochet, forme, avec la pièce *dd'*, un encliquetage, analogue à celui des clefs dites Breguet. Cette pièce, qui est la roue de mise à l'heure, est mobile le long de la partie carrée de l'arbre, sur laquelle elle est ajustée; elle se termine par une roue de champ ordinaire. Le ressort R, dont l'extrémité flexible pénètre dans la rainure de *dd*, est destiné à assurer la fonction de cette pièce au repos, tout en lui permettant de reculer pendant le décliquetage.

Pour le remontage, il suffit d'agir, avec les doigts, sur le bouton moleté du pendant, en le faisant tourner de droite à gauche. La pièce *dd'* entraîne alors le pignon *b*, grâce à l'encliquetage des rochets *b'* et *d'*. Ce mouvement du pignon a pour résultat d'armer le ressort moteur, sur l'axe duquel il agit, par l'intermédiaire d'une série de roues dentées, non représentées sur la figure.

Dans le mouvement inverse de l'arbre *aa*, de gauche à droite, le pignon *b* reste immobile et la pièce *d'd'* est seule entraînée.

Pour la mise à l'heure, on presse avec le doigt la poussette *p*, qui, en agissant sur le ressort R, produit le déplacement de la pièce *dd'* et lui fait abandonner le rochet *b'*, pour venir engrener avec la roue *k* (*fig.* 7). Cette roue, soit directement, soit par l'intermédiaire de roues dentées, transmet, à droite ou à gauche, le mouvement de l'arbre *aa* à la minuterie. Dans ce mouvement, le pignon *b* reste naturellement immobile et, quand le doigt abandonne la poussette, toutes les pièces reviennent dans la position indiquée par la *fig.* 6.

Remontoir sans poussette de la maison Patek et Philippe. — Parmi les différentes dispositions qui ont été employées par cette célèbre maison, nous signalerons simplement la plus récente, en empruntant sa description à la *Revue chronométrique*.

La *fig.* 8 (Pl. XII) représente les organes, en situation d'opérer le remontage du ressort moteur. Le pignon *b* est enfilé librement sur l'arbre *a*; il

est arrêté par une portée *k*, solidaire avec l'arbre, sur lequel elle est fixée par une vis. La pièce *d*, nommée bascule, embrasse, dans sa fourchette, la portée saillante *k* et le pignon *d*. Cette bascule, mobile sous une vis à collet, est maintenue, dans une position fixe, par la tête *e* du ressort *ee'*, laquelle tête est en contact avec une paroi inclinée de la bascule. Un second ressort *f* est destiné à presser contre une paroi de l'entaille de la mise à l'heure *s* et à maintenir cette dernière en prise avec les dents à rochet du pignon. L'effet de clef Breguet est donc obtenu au moyen de la pression de ce ressort *f*.

Lorsqu'on veut opérer le changement de position des aiguilles, on tire, du centre à la circonférence, par le bouton fixé à l'extrémité de l'arbre *a*, jusqu'à ce que la bascule *d* force le ressort *e* à glisser sur le plan incliné, avec lequel il est en contact; lorsqu'il est arrivé à l'extrémité de ce plan, le mouvement de retraite se continue encore un peu, jusqu'à ce que le ressort se soit engagé sur le bout, dans une position qui annule l'action sur la bascule, dans le sens propre à la faire tourner.

La *fig.* 9 montre les organes dans cette nouvelle position et la mise à l'heure *ss* en prise avec la minuterie. Le pignon *b*, malgré son mouvement de retraite, n'a pas quitté les dents de la roue à couronne du remontoir, et la rentrée des organes dans la position première n'offre, par suite, aucune résistance. La moindre action sur le bouton fait avancer un peu la bascule *d*, dégage le ressort *e*, en remettant les deux plans inclinés en contact, comme dans la *fig.* 8, et, comme le ressort a beaucoup de puissance, il suffit à lui seul pour remettre tout dans la position du remontage.

L'ajustement à vis de la portée *k*, sur l'arbre *a*, a pour but de faciliter la mise en boîte du mouvement et son enlèvement.

PENDULES A REMONTOIR.

Dispositif de M. Robert Houdin. — C'est à M. Robert Houdin fils, horloger à Paris, qu'on doit l'application aux pendules d'appartement des remontoirs mécaniques, déjà en usage pour les montres de prix. Dans la disposition qu'il a adoptée, le remontoir se trouve en prise, en même temps, avec le barillet des heures et avec celui de la sonnerie, de telle sorte qu'ils se remontent tous les deux à la fois et qu'il suffit, par suite, que la sonnerie ait été mise, au début, en rapport avec l'indication des aiguilles, pour que cet accord persiste indéfiniment.

La mise à l'heure des aiguilles et le réglage du pendule s'effectuent également de l'extérieur, à l'aide de renvois de mouvement.

Les combinaisons mécaniques, au moyen desquelles on obtient ces divers résultats, sont analogues à celles qu'on emploie pour les montres. Nous pouvons donc nous borner à une simple légende explicative des *fig.* 1, 2,

3, 4, 5 (Pl. XII), qui représentent l'application du système à un mouvement de pendule.

A, corps extérieur de la pendule (*fig.* 1).
B, lunette, qui peut rester constamment fermée.
C, bouton inférieur, pour le remontage des deux barillets.
D, bouton supérieur, pour la mise à l'heure et pour le réglage.
E, index de gauche, sur lequel on doit appuyer, lorsqu'on tourne le bouton D pour la mise à l'heure (*fig.* 1 et 2).
F, index de droite, sur lequel on appuie, lorsqu'on tourne le même bouton pour régler l'avance ou le retard.
G, G, platines formant la cage du mouvement de la pendule.
H, roue de chaussée, calée sur l'axe central des aiguilles (*fig.* 2 et 4).
I, roue intermédiaire, dite roue des minutes.
J, roue folle engrenant avec la roue des minutes.
K, roue également folle, munie, par derrière, d'un embrayage.
L, double pontet, servant de support à l'axe K' de la roue K.
M, roue calée à l'autre extrémité de l'axe K' (*fig.* 4) et munie, par devant, d'un embrayage, analogue à celui de la roue K.
N, roue engrenant avec M et fixée sur la tige O.
O, tige de réglage de l'avance et du retard, dont les organes sont en O'.
P, double roue d'embrayage, montée sur l'axe K' et pouvant embrayer, soit avec la roue K, pour la mise à l'heure des aiguilles, soit avec la roue M, pour le réglage de l'avance et du retard.
Q, Q, leviers à fourche, servant à manœuvrer le double embrayage P (*fig.* 2 et 3). Le levier de droite sert à embrayer avec la roue M, en appuyant sur l'index F, le levier de gauche, avec la roue K, en appuyant sur l'index E. Ces deux leviers sont sollicités par de petites lames de ressort, placées derrière et chargées de les ramener en place, c'est-à-dire de débrayer la pièce P, dès qu'on abandonne l'un ou l'autre des index E, F.

Organes du remontoir proprement dit.

R, barillet de mouvement.
S, barillet de sonnerie.
TT, roues dentées folles, montées sur les axes des barillets R et S (*fig.* 4 et 5).
UU, rôchets, avec cliquets à ressort, calés, contre chacune des roues T, sur l'axe de chaque barillet.
V, tige du remontoir, que commande le bouton C; en tournant cette tige d'un côté ou de l'autre, on fait mouvoir l'un ou l'autre des rochets U, qui donne la tension au ressort du barillet correspondant.
W, X, Y, roues intermédiaires, servant à transmettre le mouvement imprimé, à droite ou à gauche, à la tige V.
En faisant faire alternativement à cette tige, à droite et à gauche, un tour entier, on remonte simultanément les deux barillets.
Z, Z, rochets avec cliquets, fixés sur la platine antérieure G et destinés à maintenir bandés les ressorts des barillets (*fig.* 2).
a, embrayage denté (*fig.* 4), servant à transmettre à l'axe de la roue W le mouvement de la tige V. Cet embrayage est maintenu en prise, pendant le remontage, par un ressort à boudin, qui entoure la tige V du remontoir.

MÉTHODE DE M. A. BROCOT POUR LE CALCUL DES ROUAGES PAR APPROXIMATION.

Dans un rouage quelconque, le rapport des vitesses entre les deux mobiles extrêmes est représenté par une fraction ordinaire, dont l'un des termes est le produit des nombres de dents de tous les mobiles menants et l'autre le produit analogue donné par les mobiles menés.

Il résulte de là que, réciproquement, pour composer un rouage, dont le rapport des vitesses entre deux axes ait une valeur connue, on devra d'abord chercher les facteurs premiers des deux termes du rapport, et si ces facteurs ne sont pas trop grands pour être applicables à des roues, il est évident qu'on pourra reproduire rigoureusement le rapport proposé.

Mais si les nombres, fournis par cette décomposition, ne sont pas susceptibles d'être utilisés, on devra recourir à une approximation, c'est-à-dire substituer à la fraction donnée une autre fraction, qui s'en rapproche le plus possible et dont les deux termes puissent être décomposés en facteurs de grandeurs convenables.

Pour la solution de ce problème, la science fournit la méthode des fractions continues, qui jouit de la propriété de donner les nombres les plus réduits et les plus rapprochés. Mais l'application de cette méthode implique des connaissances mathématiques assez étendues et n'est, par suite, à la portée que d'un très-petit nombre de praticiens. D'un autre côté, les résultats qu'elle fournit directement sont si limités qu'on ne peut, le plus souvent, utiliser aucun d'eux.

Aussi, jusqu'à ces derniers temps, le calcul des rouages ne pouvait être, en général, qu'une affaire de tâtonnements, aussi longs que fastidieux, et il suffit, pour s'en convaincre, de se reporter aux divers passages de l'ouvrage de Moinet, relatifs *à la représentation des mouvements célestes par le mécanisme des rouages.* Nous devons ajouter que, dans un grand nombre de cas, on n'arrivait ainsi qu'à une approximation assez grossière.

M. A. Brocot, l'habile artiste auquel on doit plusieurs dispositifs d'horlogerie très-remarquables et, en particulier, un calendrier perpétuel d'une construction relativement très-simple, est arrivé à établir, pour la solution du problème qui nous occupe, une méthode pratique, qui a l'avantage d'être à la portée de tous et de fournir rapidement un grand nombre de résultats, avec tel degré d'approximation qu'on juge convenable.

Cette méthode, que l'auteur a fait connaître dans une brochure spéciale (*), repose essentiellement sur les modifications que subissent entre elles les fractions, lorsqu'on les ajoute terme à terme.

(*) *Nouvelle méthode du calcul des rouages par approximation*, par Achille Brocot, horloger, 6, rue du Parc-Royal, Paris.

Si l'on additionne ainsi deux fractions, qui comprennent, entre elles, le rapport donné, la nouvelle fraction qu'on obtiendra, sans être une moyenne entre les deux premières, aura une valeur intermédiaire.

Si sa décomposition donne des nombres premiers trop considérables, on pourra l'additionner, terme à terme, avec l'une des deux fractions dont elle dérive, et ainsi de suite. On obtiendra ainsi une série de fractions se rapprochant, de plus en plus, du rapport donné, et parmi lesquelles on pourra choisir celle qui, par sa décomposition, donnera des facteurs premiers correspondant à des mobiles de dimensions convenables.

Le travail de M. Brocot est divisé en trois parties :

Dans la première se trouvent démontrées les diverses propositions théoriques, sur lesquelles reposent les opérations ;

Dans la deuxième, ces opérations sont indiquées, d'une manière très-complète, avec de nombreux exemples d'application ;

Enfin, la troisième renferme une table de conversion en décimales de toutes les fractions ordinaires dont le dénominateur ne dépasse pas 100. Cette table est destinée à faciliter la recherche des nombres et à éviter une partie des calculs.

Nous ne dirons rien de la première partie, pour laquelle nous renverrons à la brochure de l'auteur, et nous nous bornerons à donner un exemple de l'application de la méthode, emprunté à la seconde partie.

Un des axes d'une pendule fait un tour en un jour : déterminer un rouage convenable pour qu'un autre axe fasse sa révolution en un an. — L'année se compose de 365^j, 5^h, 48^m, 48^s ou de 365^j 20928^s. Cette durée, exprimée en jours et fraction de jour, peut encore s'écrire $365 + \frac{20928}{86400}$, puisqu'il y a 86400 secondes en 24 heures.

Les vitesses des deux axes doivent donc être entre elles dans le rapport de $365 + \frac{20928}{86400}$ à 1.

Ce rapport est compris entre les deux suivants 365 : 1 et 366 : 1 :

Au 1er correspond une erreur en moins, — 20928 secondes;

Au 2e une erreur en plus, + 65472 »

En mettant tous ces nombres en regard, on forme un tableau en trois colonnes, dont la première doit être considérée comme donnant les nombres des dents de roues, la deuxième ceux des pignons, et enfin la troisième les erreurs correspondantes :

(1)

R.	P.	E.
365 :	1	— 20.928
.....	...	....
366 :	1	+ 65.472

En ajoutant, terme à terme, les rapports, ce tableau deviendra :

(2)

R.	P.	E.
365 :	1	— 20.928
.....	...	....
731 :	2	+ 44.544
366 :	1	+ 65.472

L'erreur + 44544, correspondant au nouveau rapport 731 : 2, a été obtenue en ajoutant algébriquement les deux autres erreurs, ce qui, en tenant compte des signes, revient à retrancher la première de la seconde.

En opérant de la même manière sur les rapports 365 : 1 et 731 : 2, et en continuant ainsi avec le nouveau rapport obtenu, on arrivera d'abord aux deux tableaux suivants :

(3)

R.	P.	E.
365 :	1	— 20928
......	...	....
......	...	....
1096 :	3	+ 23616
731 :	2	+ 44544
366 :	1	+ 65472

(4)

R.	P.	E.
365 :	1	— 20928
......	...	....
1461 :	4	+ 2688
1096 :	3	+ 23616
731 :	2	+ 44544
366 :	1	+ 65472

Dans ce dernier tableau, l'erreur, qui est encore positive, n'est plus que de 2688, c'est-à-dire plus faible, en valeur absolue, que 20928 qui est affectée du signe —. En continuant à ajouter les rapports, terme à terme, les erreurs correspondantes se trouveront donc affectées de ce même signe. En partant du rapport 1461 : 4, qu'on ajoutera successivement à chaque rapport obtenu, on aura :

(5)

R.	P.	E.
365 :	1	— 20928
1826 :	5	— 18240
3287 :	9	— 15552
4748 :	13	— 12864
6209 :	17	— 10176
7670 :	21	— 7488
9131 :	25	— 4800
10592 :	29	— 2112
....	...	....
1461 :	4	+ 2688
1096 :	3	+ 23616
731 :	2	+ 44544
366 :	1	+ 65472

Le nombre 2112 étant plus petit que 2688, les erreurs redeviendront

positives, jusqu'à ce qu'on arrive à un reste plus petit que 2112, etc.

On obtient ainsi le tableau définitif des valeurs approchées du rapport $365 + \frac{20928}{86400} : 1$.

	Roues.		Pignons.	Erreurs.
1	365	:	1	— 20928
2	1826	:	5	— 18240
3	3287	:	9	— 15552
4	4748	:	13	— 12864
5	6209	:	17	— 10176
6	7670	:	21	— 7488
7	9131	:	25	— 4800
8	10592	:	29	— 2212
9	22645	:	62	— 1536
10	34698	:	95	— 960
11	46751	:	128	— 384
12	105555	:	289	— 192
13	164359	:	450	0
14	58804	:	161	+ 192
15	12053	:	33	+ 576
16	1461	:	4	+ 2688
17	1096	:	3	+ 23616
18	731	:	2	+ 44544
19	366	:	1	+ 65472

L'emploi de chacun des rouages de ce tableau comportera une erreur, exprimée par une fraction de jour, ayant, pour numérateur, le nombre en regard de la dernière colonne et, pour dénominateur, le produit de 86400 par le nombre de l'avant-dernière colonne, qui représente lui-même le produit des dents des pignons.

Parmi les résultats du tableau précédent, ceux qui peuvent fournir des rouages correspondent aux nᵒˢ 6, 12, 13 et 14.

Pour ces quatre numéros, on a :

	Rapport des nombres de dents des roues et des pignons.	Erreur exprimée en secondes.
N° 6.	$\frac{7670}{21} = \frac{59.130}{3.7}$	$-\frac{7488}{21} = -366^s,6$
N° 12.	$\frac{105555}{289} = \frac{5.93.227}{1.17.17}$	$-\frac{192}{287} = -0^s,7$
N° 13.	$\frac{164359}{450} = \frac{13.47.269}{2.9.25}$	$\frac{0}{450} = 0^s,0$
N° 14.	$\frac{58804}{161} = \frac{4.61.241}{1.7.23}$	$+\frac{192}{161} = +1^s,2$

Il est bien évident que, dans ces divers rouages, les nombres 1, 2, 3, sont trop petits pour des pignons; mais rien n'empêche de les multiplier par tel nombre qu'on jugera convenable, à la condition de multiplier, par ce même nombre, l'un des facteurs du produit des roues.

Dans le cas où tous les rapports trouvés auraient eu des termes composés de facteurs trop considérables, il eut été nécessaire d'en créer d'autres, en additionnant successivement terme à terme deux rapports consécutifs.

Table de conversion des fractions ordinaires en fractions décimales. — Cette table contient, comme nous l'avons dit, toutes les fractions ordinaires dont le dénominateur n'excède pas 100, avec leurs valeurs en fractions décimales en regard.

Dans la plupart des questions, les rapports donnés sont exprimés en décimales; la table donne immédiatement leurs valeurs approchées en fractions ordinaires, sans qu'il soit nécessaire de recourir à aucun calcul.

Lorsque la fraction décimale donnée ne se trouve pas dans la table, on peut obtenir une très-grande approximation, en prenant les deux fractions consécutives, entre lesquelles elle est comprise, et en les combinant, terme à terme, dans le sens inverse du produit de l'erreur de chacune d'elles par son dénominateur.

Supposons, par exemple, qu'il s'agisse de trouver deux nombres qui soient entre eux, à très-peu près, dans le rapport de $\frac{3,1415927}{1}$ (rapport approché de la circonférence au diamètre).

Les deux fractions consécutives de la table, qui se rapprochent le plus de la partie décimale 0,1415927, sont :

$$\frac{1}{7} = 0,1428571 \quad \text{avec} \quad +\,0,0012644 \text{ d'erreur,}$$

et
$$\frac{14}{99} = 0,1414141 \quad \text{avec} \quad -\,0,0001786 \text{ d'erreur.}$$

Combinant, terme à terme, ces deux fractions, dans le sens inverse du produit de leur erreur par leur dénominateur, c'est-à-dire des nombres $\frac{1786 \times 99}{12644 \times 7} = \frac{176814}{88508}$ ou, approximativement, $\frac{2}{1}$, on aura :

$$\frac{(1 \times 2) + 14}{(7 \times 2) + 99} = \frac{2 + 14}{14 + 99} = \frac{16}{113}.$$

Si l'on substitue la fraction $\frac{16}{113}$ à la fraction 0,1415927, on obtient :

$$\frac{3 + \frac{16}{113}}{1} = \frac{3 \times 113 + 16}{113} = \frac{355}{113} = 3.14\,15929.$$

L'erreur est, par suite, de $+\,0,0000002$.

Le rapport $\frac{355}{113}$, qui se trouve ainsi naturellement fourni par la méthode de M. Brocot, est précisément celui qu'on attribue à Adrien Métius.

La table de conversion permet de simplifier notablement les opérations que nous avons indiquées, pour la détermination des nombres des rouages. Cette utilité résulte évidemment de ce fait que la table donne immédiatement deux résultats très-rapprochés et qu'il suffit, pour en trouver d'autres, d'effectuer une série d'additions.

CHAPITRE V.

APPAREILS DIVERS SE RATTACHANT A L'HORLOGERIE.

DES COMPTEURS.

Généralités. — On désigne, sous le nom générique de *compteurs*, tous les instruments qui ont pour but d'enregistrer le nombre de révolutions d'un axe tournant ou celui des mouvements alternatifs de va-et-vient d'une tige, dans un temps donné. Dans la plupart des cas, comme, par exemple, dans les compteurs de machines motrices, les tourniquets, etc., l'appareil enregistreur des mouvements fournit directement le résultat dont on a besoin, tandis que, pour les appareils destinés à la mesure du débit d'une matière quelconque, comme les compteurs à gaz, à eau, à blé, etc., les indications de nombres de tours doivent être transformées, au moyen d'expériences de tarage, en indications de volumes ou de poids.

Le nombre des compteurs existants est très-considérable et la description, même très-sommaire, des principaux types employés nous entraînerait beaucoup trop loin. Nous nous bornerons ici à l'examen de quelques compteurs de tours, spécialement utilisés dans les machines.

Totalisateur avec compteur instantané. — Cet instrument, qui est représenté, en élévation, par la *fig.* 3 (Pl. XVIII), en coupes par les *fig.* 1 et 2 (Pl. XVII), permet de faire, avec une très-grande précision, des observations d'une faible durée, résultat qu'on n'obtiendrait que très-imparfaitement avec le compteur ordinaire, surtout dans les machines à grande vitesse.

L'instrument se compose essentiellement d'une série de neuf roues à rochet R, six à la partie inférieure et trois à la partie supérieure. Ces roues sont montées sur des axes, qui traversent les deux platines ABC, A'B'C', solidement reliées entre elles par de fortes goupilles. Tous ces axes, à l'exception de deux, sont munis de doigts T, qui participent au mouvement des roues à rochet, ainsi que les plateaux P, qui portent, à leur circonférence, la série des nombres, depuis 0 jusqu'à 9 inclusivement Ces chiffres apparaissent successivement à travers les petites lucarnes, ménagées sur la platine antérieure. Sur cette même face, les axes se terminent par des carrés, en saillie, qui permettent, comme nous le verrons, de remettre l'appareil à zéro, lorsqu'on le juge convenable.

L'appareil porte, en outre, un levier à deux branches L, qui peut

tourner d'un certain angle autour de son axe O; le déplacement de ce levier se traduit par celui du taquet V, destiné à agir sur les dents de la première roue à rochet; ce taquet revient chaque fois à sa position initiale par l'action d'un ressort plat. Des ressorts en spirale, enroulés autour des petits axes des rochets R, maintiennent ces pièces constamment appuyées sur les dents des roues.

Voyons maintenant quel est le jeu de l'appareil, en supposant d'abord qu'il soit réduit aux six roues de la partie inférieure, c'est-à-dire qu'il constitue un simple compteur ordinaire.

Le levier L est relié, par la bielle B, à l'organe de la machine dont on veut enregistrer le nombre de tours ou de mouvements alternatifs. — Après avoir déterminé, sur cet organe, un point dont la course soit identique à celle de l'un des trous du levier L, il est utile d'adopter, pour la bielle, une forme qui lui permette un certain allongement, comme, par exemple, celle de la *fig.* 3 (Pl. XVIII); d'une manière générale, il est nécessaire que la liaison soit légèrement élastique, pour qu'on n'ait rien à redouter dans le cas où la course de l'organe serait un peu supérieure à celle que permet le déplacement angulaire du levier. Il est essentiel, d'ailleurs, que ce levier décrive bien chaque fois sa course entière.

L'appareil étant supposé ramené à zéro, à partir du moment où l'on établit la jonction par la bielle, le levier L prend un mouvement oscillatoire, et le taquet V, à chaque oscillation, fait tourner d'une dent la première roue à rochet; le plateau correspondant amène donc successivement, derrière la première lucarne, tous les chiffres de 0 à 9. Une nouvelle oscillation se produisant, le chiffre 9 disparaît et est remplacé par 0, mais, en même temps, le doigt T de la première roue est venu agir sur une dent de la seconde et le chiffre 1 est apparu derrière la seconde lucarne; puis, ce doigt ayant échappé, la première roue seule fonctionne jusqu'à la nouvelle apparition du chiffre 9; le doigt T est alors en contact avec la seconde roue et, à l'oscillation suivante, fait paraître le chiffre 2, en même temps que la première lucarne indique 0. — Les deux premières roues sont seules en mouvement, jusqu'à ce qu'on soit arrivé à 99. A ce moment, le doigt T de la seconde roue est prêt à agir sur une dent de la troisième et, à l'oscillation suivante, la troisième lucarne indique le chiffre 1 et les deux premières 0.

La mise en jeu des trois autres roues se fait successivement de la même manière, à mesure qu'on arrive aux nombres 1.000, 10.000 et 100.000. Avec six lucarnes, le plus grand nombre que puisse marquer le compteur est donc 999.999. En supposant ce nombre atteint, il suffit d'une seule oscillation de levier pour faire disparaître tous les 9 et les remplacer par des 0.

C'est ce qu'on fait, du reste, pour remettre l'appareil à zéro, avant de commencer une opération. Au moyen de la clef, on fait tourner tous les

axes dans les sens des flèches, en commençant par celui de gauche, de manière à faire apparaître tous les 9 par les lucarnes; puis on ajoute une unité, en agissant à la main sur le levier, et tous les 9 se trouvent remplacés par des o.

Si l'on veut s'éviter la remise à zéro, on peut se borner à observer le nombre indiqué par le compteur, avant la mise en marche; il suffit alors, pour obtenir le résultat cherché, de retrancher ce nombre de celui que marque le compteur à la fin de l'opération.

Il est maintenant facile de se rendre compte du rôle que jouent les trois roues supérieures, qui constituent, à vrai dire, le compteur instantané. L'axe de la première roue à rochet du bas porte un pignon *n*, engrenant avec une roue N, folle sur un axe spécial; sur ce même axe est calée une roue semblable N′, en relation avec un pignon *n*′, calé sur l'axe de la première roue à rochet de la série supérieure. Dans la position représentée sur la figure, les deux parties du manchon S étant écartées, la roue N tourne librement sur son axe et la roue N′ est immobile; mais, en agissant sur le levier E, on produit l'embrayage du manchon et le compteur instantané se trouve mis en marche; pour l'arrêter, il suffit évidemment d'agir sur le levier E en sens inverse.

Il est facile, d'après cela, d'indiquer la manière de procéder pour une observation. Supposons, par exemple, qu'on veuille connaître le nombre de mouvements effectués dans une minute :

Le compteur du bas étant en marche et le compteur instantané étant désembrayé, on relève le nombre indiqué par les trois chiffres de ce compteur, si l'on ne l'a pas ramené à zéro; puis, lorsque l'aiguille d'une montre à secondes est arrivée à 60, on embraye, en agissant légèrement sur le levier E, et on laisse marcher jusqu'à ce que l'aiguille ait fait sa révolution complète; à ce moment, on agit de nouveau sur le levier E, en sens inverse, et le compteur s'arrête instantanément; la différence, entre le nombre marqué sur ce compteur et celui relevé à l'origine, fournit immédiatement le nombre de mouvements pour une minute.

Il peut arriver qu'avant de commencer une observation le nombre, indiqué par les trois chiffres, soit tel que le compteur marque 999, avant la fin de l'observation; dans ce cas, au chiffre relevé après l'expérience, il convient d'ajouter la différence entre 1.000 et le nombre primitif.

Ainsi, par exemple, si le compteur marquait d'abord 940 et ensuite 135, le résultat cherché serait représenté par $60 + 135 = 195$.

Compteur contrôleur horaire. — Cet appareil, qui est représenté (*fig.* 1, Pl. XVIII), permet de contrôler, immédiatement et sans aucune opération, la régularité de la marche d'une machine.

Il se compose essentiellement de deux cadrans et d'un compteur totalisateur ordinaire, dont le levier est mis en relation avec l'arbre de la

machine, par l'intermédiaire d'une petite bielle et d'un renvoi, actionné par un excentrique.

L'un des cadrans appartient à une véritable horloge, marquant les secondes, tandis que l'autre, qui présente à l'extérieur un aspect identique, constitue l'appareil de contrôle, proprement dit. A cet effet, le mécanisme de ce cadran est mis en communication avec le levier du totalisateur.

Supposons que le nombre de tours de la machine soit de cinquante par minute, le mécanisme du cadran contrôleur sera établi de manière à ce que celle de ses aiguilles, qui correspond à celle des secondes de l'autre cadran, termine un tour entier, toutes les fois que la machine aura transmis cinquante oscillations à la bielle et, par suite, au levier. Si la marche de la machine est régulière, cette aiguille aura la même vitesse moyenne de rotation que l'aiguille des secondes de l'horloge, tandis qu'elle sera en avance ou en retard, si le mouvement de la machine s'accélère ou se ralentit.

En agissant sur un bouton indicateur dont il est muni, on peut d'ailleurs régler, à volonté, le mécanisme du cadran contrôleur, de manière à ce que l'aiguille fasse son tour entier, pour tel nombre de tours qu'on juge convenable. L'appareil peut donc servir à contrôler des marches différentes d'une même machine.

Les aiguilles des heures et des minutes du cadran contrôleur, par comparaison avec celles de l'horloge, indiquent les quantités totales d'avance ou de retard de la marche, pendant un temps donné, tandis que le totalisateur fournit le nombre de tours pendant le même temps.

Contrôleur totalisateur enregistreur de la marche des machines. — Cet appareil, représenté (*fig.* 1, Pl. XVI) a pour fonction de totaliser le nombre de tours d'une machine, d'enregistrer ce nombre, en même temps que les arrêts, les mises en route, les durées des intermittences et les vitesses de marche.

Une horloge A, qui donne l'heure sur un cadran ordinaire, fait mouvoir un disque B, à raison d'un tour entier en 24 heures. Ce disque reçoit tous les jours un cadran, en papier, portant un grand nombre de divisions, correspondant aux heures et fractions d'heure. Entre les deux chiffres 12 règne un trait noir circulaire C, qui sert à distinguer les heures de nuit. Les divisions du cadran sont parallèles au mouvement d'un porte-crayon D, qui est commandé par un axe E, placé au-dessus du disque. Cet axe reçoit lui-même son mouvement d'une petite bielle F, articulée, d'un côté, au bras G et, de l'autre, à la détente H d'un totalisateur, dont le levier I est actionné par la machine.

Après chaque période complète de cent tours, la détente H se lève d'un dixième de sa course totale et, par suite du mouvement ainsi transmis, le

crayon décrit, sur le cadran, un petit trait s'éloignant du centre. Pour produire cet effet, le levier horizontal de la détente porte un petit appendice, qui, par l'action d'un ressort, est maintenu pressé contre une came, montée sur l'axe de la troisième roue à rochet du totalisateur. Le profil de cette came est déterminé de telle manière que, pour chaque passage d'une dent de la roue, c'est-à-dire pour une rotation d'un dixième de tour, le déplacement, produit par la came, soit le dixième de la différence entre le plus grand et le plus petit rayon de cette came.

Pendant les cent tours suivants, le crayon reste immobile et trace, par conséquent, un trait circulaire. Puis, après les cent tours, la détente se lève de nouveau et le crayon décrit un nouveau trait s'éloignant du centre. Chaque trait est d'un dixième de la course totale.

Quand le totalisateur arrive à marquer 1.000, la détente est à l'extrémité de sa course ascendante, puisqu'elle repose sur le plus grand rayon de la came, et elle redescend brusquement sur le petit rayon, en entraînant le crayon, qui, cette fois, marque un trait se rapprochant du centre et d'une longueur égale à la somme des 10 traits, qu'il a tracés précédemment. Chaque petit trait indique, comme on le voit, 100 tours et chaque grand trait 1.000.

L'examen des cadrans de papier, qu'on retire chaque jour, permet de se rendre facilement compte de toutes les circonstances du mouvement. En comparant les longueurs comprises entre les différents traits, il est facile de s'assurer si la marche a été régulière ou si elle a subi des variations de vitesse, des intermittences, etc.

Contrôleur de monte-charges. — Cet appareil, représenté en élévation par la *fig.* 3 et en coupe par la *fig.* 4 (Pl. XVII), est utilisé pour contrôler le nombre des charges dans les puits de mines, les hauts fourneaux, etc.

Il doit être établi dans une position telle que chaque benne, dans son ascension, vienne rencontrer un levier F, destiné à indiquer son passage.

L'appareil se compose d'une boîte en tôle AA, dans l'intérieur de laquelle se trouve disposé un mouvement d'horlogerie B, qui a pour fonction de faire tourner un disque en cuivre C, sur lequel se fixe un cadran en papier, qu'on change tous les jours. Ce cadran est destiné à recevoir les indications d'un porte-crayon D, dont le bras est calé sur le même axe que le levier E, lequel peut basculer sous l'action du premier levier F.

Pendant tout le temps que ce levier reste libre, c'est-à-dire n'est pas rencontré par une benne, le porte-crayon reste en repos et le crayon trace, par suite, sur le cadran mobile, un trait circulaire; mais, lorsqu'il se produit une rencontre, le levier E est déplacé vers le bas, le bras de D tourne autour de son axe et le crayon décrit, par suite, un petit arc se rapprochant du centre du cadran.

Le couvercle de la boîte est muni d'un guichet G, qui permet de lire l'heure sur le cadran en papier.

L'examen de ce cadran fournit donc le moyen de vérifier, par une simple lecture, le nombre de bennes qui ont passé dans une journée et, par l'examen des écartements des différents traits, il est facile de se rendre compte de la régularité plus ou moins grande, avec laquelle les différentes charges se sont succédées.

Compteurs pour omnibus. — Il existe plusieurs dispositions différentes de compteurs pour omnibus. Dans celle de M. Collin, que représente la *fig.* 4 (Pl. XIX), un cadran divisé porte, sur la circonférence, la série des nombres pairs de 2 à 30 ; pour éviter la confusion, les nombres impairs sont supprimés et remplacés simplement par des points. Au centre du disque se trouve une aiguille, montée sur le même axe qu'une roue à rochet intérieure, sur laquelle on agit, au moyen du levier figuré à droite. Pour chaque oscillation imprimée au levier, l'aiguille se déplace d'une division, de telle sorte que, si elle se trouve d'abord sur un chiffre, elle vient en regard du point suivant. Le mouvement se communique à un second disque en verre dépoli, dont les chiffres viennent apparaître successivement, à travers une lucarne, ménagée à la partie supérieure du disque. Le chiffre de la lucarne est toujours le même que celui de l'aiguille ; il est visible pendant la nuit, grâce à une petite lanterne qu'on place en arrière.

Dans d'autres dispositifs, les disques divisés sont tous à l'intérieur et l'on ne voit apparaître, par des lucarnes, que le chiffre indiquant le total des entrées de personnes, depuis le moment où l'appareil a été remis à zéro par le contrôleur d'une station, qui possède, à ce sujet, deux clefs, l'une pour ouvrir le compteur, l'autre pour faire tourner les disques.

Compteurs pour jeu, pour chaises, etc. — Le principe du mécanisme de ces appareils est identiqne à celui de tous les compteurs dont il vient d'être fait mention. Pour le compteur de jeu (*fig.* 6, Pl. XIX), en agissant sur le levier qu'on voit à la partie inférieure, on déplace, chaque fois, d'une dent la première roue à rochet à droite, laquelle fait tourner la seconde d'une dent, chaque fois qu'elle a tourné elle-même de dix dents. Le mouvement du levier détermine, en même temps, la chute d'un petit marteau sur un timbre, destiné à prévenir toutes les fois qu'on marque un coup.

Le compteur pour chaises (*fig.* 5, Pl. XIX) offre une disposition analogue, sauf le timbre, qui n'aurait évidemment aucune utilité. Cet appareil peut être utilisé dans tous les cas où l'on veut contrôler la perception de droits fixes, comme dans les ponts à péage, les expositions, etc.

Tourniquets. — Le tourniquet (*fig.* 6, Pl. XIX) repose encore sur le

même principe que le compteur; la totalisation des entrées a également lieu, au moyen d'une série de roues à rochet, qui se commandent successivement. Le mouvement du premier axe est déterminé par le passage même de chacune dès personnes, dont il s'agit d'enregistrer les entrées; par suite de la disposition qui a valu son nom à l'appareil, ce passage détermine une rotation d'un quart de tour, qui fait sauter d'une dent la première roue à rochet.

MARÉGRAPHES.

On désigne, sous le nom de *marégraphes*, les appareils destinés à enregistrer automatiquement le niveau de la mer et, d'une manière générale, le niveau variable d'une masse liquide quelconque.

Marégraphe à cylindre horizontal. — La *fig.* 2, Pl. XVIII, représente le marégraphe imaginé par M. Collin. Cet appareil se compose essentiellement d'un grand cylindre horizontal, qu'un mouvement d'horlogerie fait tourner d'une vitesse uniforme. Parallèlement à l'axe du cylindre, peut se mouvoir un petit chariot, qui porte un stylet ou un crayon. Le mouvement de ce chariot est déterminé par un flotteur, installé dans un puits, qui se trouve en libre communication avec la masse liquide extérieure, dont il s'agit d'enregistrer les variations de niveau. Si le niveau restait constant, le crayon n'éprouverait aucun déplacement et tracerait, par suite, sur le cylindre, un cercle, dont le plan serait perpendiculaire aux génératrices. Mais, lorsque le niveau varie, le crayon se meut parallèlement à l'axe, dans un sens ou dans l'autre, suivant que le niveau s'élève ou s'abaisse; ses déplacements, qui se combinent avec la rotation du cylindre, se traduisent par une courbe, tracée sur la surface de ce dernier, recouvert, à cet effet, d'une feuille de papier divisé, que l'on renouvelle, plus ou moins fréquemment, suivant la vitesse de rotation donnée au cylindre.

Si l'on prend le grand cercle correspondant à la position du crayon, au moment choisi pour l'origine du temps, la durée du mouvement, à un instant quelconque, sera représentée par l'arc de cercle, décrit par le cylindre, tandis que la différence, entre les niveaux à l'origine et à l'instant considéré, sera donnée par la longueur de la génératrice comprise entre le cercle et la courbe. Les sinuosités plus ou moins fortes de cette courbe accusent, en outre, très-nettement les variations brusques naturelles ou insolites.

Marégraphe à cylindre vertical. — Cet appareil, qui est représenté *fig.* 3, Pl. XVI, remplit les mêmes fonctions que le précédent, mais il est un peu plus léger et exige moins de place pour son installation. Dans cette

nouvelle disposition, on a superposé le cylindre enregistreur A, les rouages moteurs B, les volants C, etc., ce qui permet de renfermer l'appareil complet dans une boîte en bois D, facilement transportable, et de l'installer rapidement au-dessus du puits, destiné à recevoir le flotteur.

Ce marégraphe est donc essentiellement portatif. En dehors des organes enregistreurs, il est muni d'un avertisseur électrique E et d'un contrôleur du service des employés.

Ses fonctions, qui sont assez multiples, grâce à tous ces organes additionnels, peuvent se résumer ainsi qu'il suit :

Tracer, d'une manière continue, sur la même feuille de papier (pendant plusieurs jours, si c'est nécessaire), le niveau variable d'une mer, d'un fleuve, d'un canal ou d'une écluse.

Constater les heures d'ouverture d'une écluse pour le passage des bateaux.

Avertir, par une sonnerie, de l'établissement d'un niveau d'eau déterminé.

Contrôler le service des rondes des employés ou veilleurs de nuit, en enregistrant les heures, auxquelles ils sont venus faire constater leur présence sur l'appareil.

Lorsque le marégraphe est en fonction, il est fermé par une clef, qui reste entre les mains du chef de service. — La porte est munie d'une ouverture vitrée, qui permet d'apercevoir le cadran de l'horloge. — A la partie inférieure de cette même porte, se trouve établi un bouton mobile, qui, lorsqu'on le presse, vient tracer un signe sur le cylindre. Comme la génératrice, sur laquelle ce signe se trouve ainsi tracé, correspond à une heure déterminée, on a là une constatation exacte de la présence de l'employé à cette même heure.

Chaque feuille de papier, une fois remplie, est retirée du cylindre et collée à la suite de la précédente. On peut ainsi, avec toutes les feuilles d'un même mois, par exemple, former une bande unique, d'une lecture facile, qui permet de retrouver, à un moment quelconque, les renseignements dont on peut avoir besoin.

MÉTRONOMES.

Métronome Maëlzel. — Le prolongement d'un pendule, au-dessus de son point de suspension, permet de lui faire battre un plus petit nombre d'oscillations, dans le même temps, c'est-à-dire d'obtenir des oscillations aussi lentes qu'on le désire.

Cette observation a été appliquée d'une manière très-ingénieuse par Maëlzel dans le *métronome*, instrument qui sert à battre la mesure musi-

cale et qui est trop connu pour qu'il soit nécessaire de le décrire. La *fig.* 3, Pl. XIX, donne la disposition ordinaire.

Métronome électrique. — Le *métronome électrique*, représenté par les *fig.* 1 et 2, Pl. XIX, est utilisé, dans certains théâtres, pour mettre le chef d'orchestre en relation avec les musiciens ou les chœurs, placés sur la scène ou dans les coulisses.

Le chef d'orchestre appuie simplement sur un bouton, à contact électrique, relié par des fils au métronome, qui se trouve placé sous les yeux des artistes, auxquels il faut indiquer la mesure. Chaque pression exercée sur le bouton détermine le passage du courant dans les fils et donne, par suite, le mouvement au balancier du métronome.

SONDEUR OU PLOMB DE SONDE LE COËNTRE.

Cet appareil, qui, depuis 1868, est devenu règlementaire sur les bâtiments de l'État, est destiné à fournir, par une simple lecture sur un cadran, la profondeur de la mer en un point quelconque.

L'élément essentiel du mécanisme consiste dans une hélice A (*fig.* 2, Pl. XVI), calée à la partie supérieure d'un arbre B, dont l'autre extrémité porte une vis sans fin C. Cette vis commande une roue D, sur l'arbre de laquelle est calé un pignon *e*, engrenant avec une roue E, qui est la roue des unités et dizaines. L'arbre de cette roue porte lui-même un second pignon *f*, qui engrène avec la roue F des centaines. Aux deux roues E et F correspondent deux disques divisés. Les divisions du premier représentent des mètres et dizaines de mètres, celles du second des centaines de mètres.

Ces cadrans, sur lesquels se meuvent des aiguilles, calées sur les axes des roues E et F, peuvent être protégés par une plaque mobile à charnière. Le corps principal du sondeur est en plomb, à l'exception de la partie qui correspond au mécanisme et qui est en bronze.

Pour faire une opération, on laisse couler l'appareil le plus verticalement possible, résultat qu'il est facile d'obtenir, en jetant à la mer, au moment où on le laisse tomber, une quantité suffisante de ligne en glènes, afin qu'il puisse arriver au fond présumé, sans éprouver d'autre résistance que celle du fluide qu'il doit traverser. Dans ces conditions, le sondeur descendant sous l'action de son propre poids, l'hélice tourne d'une quantité déterminée, pour un parcours d'un mètre, et le nombre de tours effectué, jusqu'au moment où le sondeur touche le fond, se trouve reporté sur les cadrans, en nombre de mètres parcourus.

Comme cette lecture ne peut évidemment se faire que lorsque le sondeur est remonté, il est essentiel que l'hélice, dans ce mouvement, ne soit plus

en communication avec le mécanisme. A cet effet, l'arbre de la vis sans fin est muni d'un embrayage G, qui, sous l'action de la pression de l'eau s'exerçant sur l'hélice, vient s'engager dans un arrêt fixe H, lorsque le sondeur touche le fond et empêche, par suite, les cadrans de tourner en sens inverse, lorsqu'on remonte l'appareil.

Il est indispensable de haler le plomb, sans laisser filer la ligne de nouveau, lorsqu'il a touché le fond, parce que, dans ce cas, le plomb, en retombant, ferait parcourir aux aiguilles de nouvelles divisions, qui viendraient vicier le résultat réel.

Une cavité, pratiquée à la base du plomb du sondeur, est destinée à recevoir du suif, qui rapporte un échantillon de la nature du fond.

Pour se rendre compte de l'exactitude des compteurs, soit en rade, soit en mer, il suffit de sonder avec une ligne, fixée au couronnement du navire, à 40 ou 50 mètres, et de jeter le plomb, qui s'arrêtera nécesssairement à une profondeur égale à la longueur de la ligne fixée à bord.

FIN.

TABLE DES MATIERES

DE L'APPENDICE

AU

TRAITÉ GÉNÉRAL D'HORLOGERIE DE MOINET

CHAPITRE I.

DES ÉCHAPPEMENTS.

CHAPITRE II.

DES RÉGULATEURS.

CHAPITRE III.

HORLOGERIE ÉLECTRIQUE.

CHAPITRE IV.

APPLICATIONS DIVERSES.

CHAPITRE V.

APPAREILS SE RATTACHANT A L'HORLOGERIE.

2670 Paris. — Imprimerie Arnous de Rivière et Cᵉ, rue Racine, 26.

LES

MONTRES MARINES

PARIS. - IMPRIMERIE ARNOUS DE RIVIÈRE, RUE RACINE, 26.

LES

MONTRES MARINES

DESCRIPTION, THÉORIE ET PERTURBATIONS

(EXTRAIT DES *NOUVELLES MÉTHODES DE NAVIGATION*)

PAR

A. LEDIEU, ✻, O ✿, ✻,

ANCIEN OFFICIER DE VAISSEAU, EXAMINATEUR DE LA MARINE,
PRIX EXTRAORDINAIRE DE L'ACADÉMIE DES SCIENCES POUR L'APPLICATION
DE LA VAPEUR A LA FLOTTE,
CORRESPONDANT DE L'INSTITUT.

OPUSCULE RÉDIGÉ
POUR LA PARTIE TECHNIQUE
AVEC
LE CONCOURS DE **M. A. H. RODANET**,
Constructeur de chronomètres

PARIS
DUNOD, ÉDITEUR
LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES
ET DES TÉLÉGRAPHES
Quai des Augustins, 49

1877

TABLE DES MATIÈRES.

1

§ II. VARIATIONS NORMALES DES MARCHES DES CHRONOMÈTRES, ET VARIATIONS ANORMALES OU PERTURBATIONS.

FIN DE LA TABLE DES MATIÈRES.

AVANT-PROPOS.

La fabrication des montres marines a fait depuis quelques années des progrès notables. D'autre part, ces précieux instruments ont été dans ces derniers temps, à bord de beaucoup de navires, l'objet de recherches remarquables sur leur tempérament et leurs perturbations.

Nous croyons donc rendre service à l'art de l'horlogerie en mettant à la portée de ses nombreux adeptes une étude présentant un caractère particulier d'originalité. Nous avons extrait cette étude de notre important ouvrage *Les nouvelles méthodes de Navigation*, où se trouvent traités et discutés *in extenso* tous les perfectionnements récents introduits dans la science nautique.

En publiant cet opuscule, nous adressons nos remerciments les plus mérités à *M. A. H. Rodanet*, un de nos plus habiles chronométriers, qui a bien voulu nous fournir les renseignements techniques ainsi que les dessins nécessités par la nature de la publication.

NOTA.

Avant d'entrer dans le vif de la question, nous donnerons le dessin d'un *chronomètre démonstratif* et sa légende explicative.

Ce mode de procéder est justifié par la considération que le dessin dont il s'agit, au lieu d'être afférent à un numéro particulier, concerne l'ensemble du paragraphe premier de cet opuscale.

Fig. 1. *Chronomètre démonstratif* (Echelle-$\frac{3}{4}$)

A. LEDIEU. Les nouvelles méthodes de Navigation.

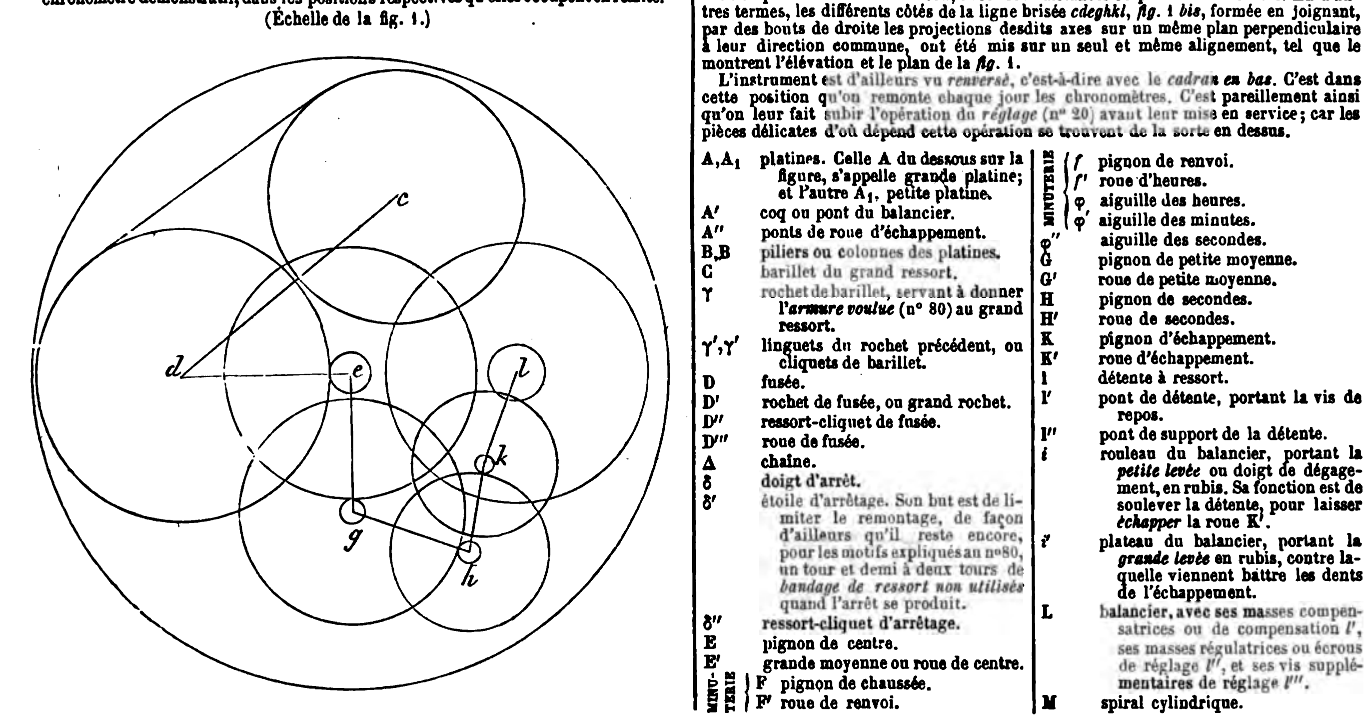
Elévation

Plan

A. H. Rodanet dir.^t

K. Perat sculp.

Fig. 1 *bis*. — Plan des cercles primitifs des diverses roues et autres pièces circulaires du chronomètre démonstratif, dans les positions respectives qu'elles occupent en réalité. (Échelle de la fig. 1.)



La *fig.* 1 a été obtenue en ramenant tous les axes des diverses pièces et roues dans le plan de deux d'entre eux, avec leurs distances respectives conservées. En d'autres termes, les différents côtés de la ligne brisée *cdeghkl*, *fig.* 1 *bis*, formée en joignant, par des bouts de droite les projections desdits axes sur un même plan perpendiculaire à leur direction commune, ont été mis sur un seul et même alignement, tel que le montrent l'élévation et le plan de la *fig.* 1.

L'instrument est d'ailleurs vu *renversé*, c'est-à-dire avec le *cadran en bas*. C'est dans cette position qu'on remonte chaque jour les chronomètres. C'est pareillement ainsi qu'on leur fait subir l'opération du *réglage* (n° 20) avant leur mise en service; car les pièces délicates d'où dépend cette opération se trouvent de la sorte en dessus.

A,A₁		platines. Celle A du dessous sur la figure, s'appelle grande platine; et l'autre A_1, petite platine.
A'		coq ou pont du balancier.
A''		ponts de roue d'échappement.
B,B		piliers ou colonnes des platines.
C		barillet du grand ressort.
γ		rochet de barillet, servant à donner l'*armure voulue* (n° 80) au grand ressort.
γ',γ'		linguets du rochet précédent, ou cliquets de barillet.
D		fusée.
D'		rochet de fusée, ou grand rochet.
D''		ressort-cliquet de fusée.
D'''		roue de fusée.
Δ		chaîne.
δ		doigt d'arrêt.
δ'		étoile d'arrêtage. Son but est de limiter le remontage, de façon d'ailleurs qu'il reste encore, pour les motifs expliqués au n° 80, un tour et demi à deux tours de *bandage de ressort non utilisés* quand l'arrêt se produit.
δ''		ressort-cliquet d'arrêtage.
E		pignon de centre.
E'		grande moyenne ou roue de centre.
MINU-TERIE	F	pignon de chaussée.
MINU-TERIE	F'	roue de renvoi.
MINUTERIE	f	pignon de renvoi.
MINUTERIE	f'	roue d'heures.
MINUTERIE	φ	aiguille des heures.
MINUTERIE	φ'	aiguille des minutes.
φ''		aiguille des secondes.
G		pignon de petite moyenne.
G'		roue de petite moyenne.
H		pignon de secondes.
H'		roue de secondes.
K		pignon d'échappement.
K'		roue d'échappement.
l		détente à ressort.
l'		pont de détente, portant la vis de repos.
l''		pont de support de la détente.
i		rouleau du balancier, portant la *petite levée* ou doigt de dégagement, en rubis. Sa fonction est de soulever la détente, pour laisser *échapper* la roue K'.
i'		plateau du balancier, portant la *grande levée* en rubis, contre laquelle viennent battre les dents de l'échappement.
L		balancier, avec ses masses compensatrices ou de compensation *l'*, ses masses régulatrices ou écrous de réglage *l''*, et ses vis supplémentaires de réglage *l'''*.
M		spiral cylindrique.

On trouvera dans le cours du texte, du n° 1 au n° 7, toutes les explications voulues sur le rôle et le fonctionnement des diverses pièces dont nous venons de donner la nomenclature.

On remarquera que le balancier et l'échappement forment, sur notre modèle, un système tout à fait à part du reste du mécanisme. Cette disposition, qui est en général adoptée par les bons fabricants, offre l'avantage de mettre ainsi bien en vue les différentes pièces de l'échappement, afin que l'artiste puisse en examiner les fonctions pendant les diverses périodes du *réglage*. — Cependant dans les chronomètres anglais, tout le mécanisme de l'échappement se trouve, par rapport à la petite platine, du côté opposé au balancier. Cette pratique, due à la routine, offre l'inconvénient de tenir caché le jeu de l'échappement, qu'il y a cependant tout avantage à rendre aussi visible que possible pour l'examen de son fonctionnement.

Il nous reste à dire que l'ensemble du chronomètre, avec, bien entendu, les pièces ramenées dans leurs positions réelles, comme le montre la *fig.* 1 *bis*, est renfermé de toutes parts dans une boîte en cuivre, avec verre du côté du cadran. Cette boîte est destinée à empêcher la poussière de pénétrer dans les rouages. Elle porte dans son fond un trou pour le passage de la clef de remontage. Ce trou se ferme à volonté par un diaphragme. Souvent aussi, il forme en outre le débouché d'un canon enveloppant le carré de l'arbre de fusée, comme le montre la *fig.* 2. — En tout état de cause, la boîte en question sert d'attache à la suspension à la Cardan, qui supporte l'instrument à l'intérieur d'une solide caisse carrée en bois de chêne ou d'acajou, formant la dernière enveloppe du système. Un stopeur, placé dans un des angles de la caisse, permet de fixer la suspension, et par suite le chronomètre, pour tout transport de l'instrument.

LES

MONTRES MARINES

---

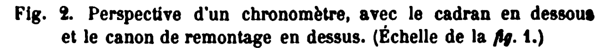
§ I.

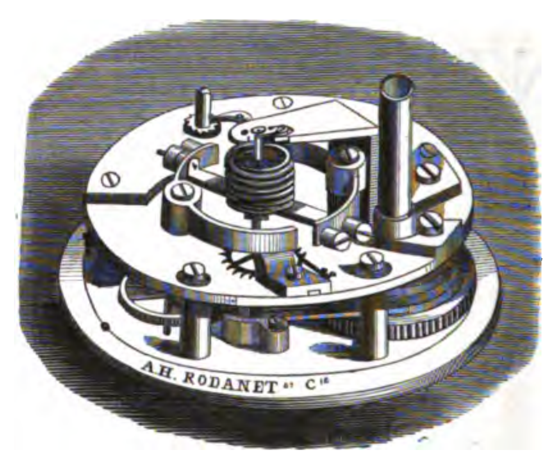
ÉTUDE DU MÉCANISME DES CHRONOMÈTRES.

N° 1. Description d'ensemble d'un chronomètre. Son prix. — La *fig.* 1 représente un chronomètre marin démonstratif, où on a ramené *fictivement* tous les axes de rotation des diverses pièces de mécanisme, qui sont, du reste, parallèles entre eux, à se trouver dans un même plan, de façon à mettre toutes ces pièces en une parfaite évidence, sans rien modifier, par ailleurs, à leurs corrélations. En un mot, le chronomètre démonstratif a été obtenu en alignant sur une même droite les différentes parties de la ligne brisée *cdeghkl*, *fig.* 1 *bis*, formée en joignant les projections des centres de tous les axes du mécanisme sur un même plan perpendiculaire à leur direction commune, ce développement s'effectuant sans rien changer aux longueurs respectives desdites parties, et par suite aux distances respectives des axes. — Pour compléter la représentation graphique d'un chronomètre, nous donnons en *fig.* 2 ci-contre, la perspective de l'instrument, tel qu'il existe en réalité, étant sorti de la boîte en cuivre qui renferme tout le mécanisme.

Comme nous l'avons dit dans la légende de la page précédente,

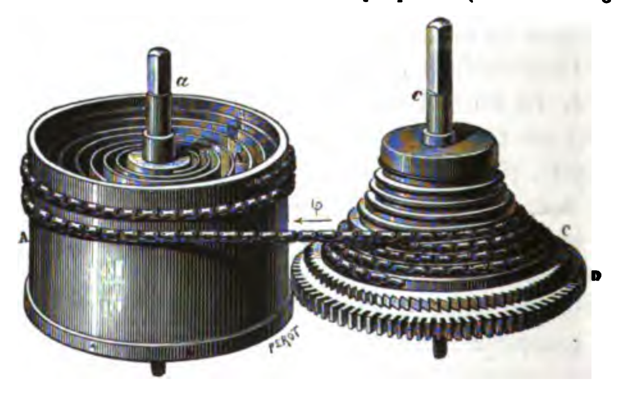
les chronomètres sont logés à l'intérieur d'une caisse en bois de chêne ou d'acajou, à laquelle ils sont reliés par une suspension à la Cardan.


Fig. 2. Perspective d'un chronomètre, avec le cadran en dessous et le canon de remontage en dessus. (Échelle de la *fig.* 1.)



— Ladite légende, qui accompagne la *fig.* 1, donne la nomenclature exacte de toutes les pièces. Il faut maintenant résumer rapidement le fonctionnement de celles-ci.

Fig. 3. Barillet et fusée de chronomètre vus en perspective. (Échelle de la fig. 1.)

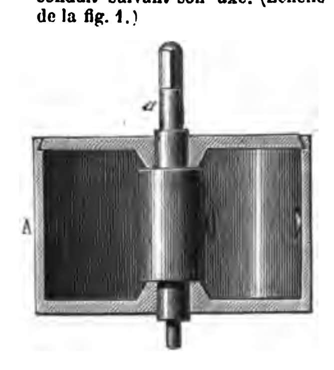


Dans toutes les montres, le moteur est un **grand ressort** formé d'une lame d'acier mince A', *fig.* 3, et très-longue, qui a été tra-

vaillée de manière à s'enrouler d'elle-même en spirale, sans du reste être trop trempée, et par suite trop fragile. L'extrémité intérieure du ressort est tenue par un crochet faisant corps avec une partie renflée d'un *arbre* fixe *a*; et son extrémité extérieure est pareillement accrochée à la surface interne d'un tambour en métal A, appelé *barillet*, qu'on voit dessiné à part en *fig. 4*. Le barillet est fermé par un fond et un couvercle concentriques audit arbre *a*, et est installé pour tourner autour de celui-ci. — Le grand ressort, après avoir été tendu par le montage, revient lentement à sa forme normale, en faisant tourner le barillet autour de son axe. Le barillet transmet le mouvement de rotation précédent à tout un système d'engrenages, qui forme le *rouage*.

Dans les chronomètres, la transmission s'opère au moyen d'une chaîne, *fig.* 3, formée d'une suite de maillons goupillés entre eux, le tout combiné de façon à former un ruban métallique aussi souple que possible. Ladite chaîne a l'une de ses extrémités fixée au pourtour du barillet A par un crochet en patte d'ancre formant le dernier maillon de l'extrémité considérée, et s'incrustant dans ledit pourtour. Puis, elle est enroulée sur une sorte de tronc de cône C de forme particulière (n° 9), appelé *fusée;* et elle va s'attacher à la grande base de cette pièce par un œil appartenant au dernier maillon de la deuxième extrémité, et qui vient se capeler sur un tenon implanté dans ladite base parallèlement à l'axe de la fusée. Ce dernier mode d'attache, qui diffère entièrement du mode précédent, et ce mode précédent lui-même, ont leurs raisons d'être expliquées par ce qui suit. — Quant à la fusée, elle est portée par un axe *c*; et sa surface offre une série de gradins formant une courbe rampante, qui soutient la chaîne.

Fig. 4. Vue intérieure d'un barillet de chronomètre, coupé par un plan conduit suivant son axe. (Échelle de la fig. 1.)



Lorsque le chronomètre est EN HAUT DE REMONTAGE (n° 3), la chaîne se trouve en très-grande partie, mais non en totalité, sur la fusée. Elle demeure enroulée de 1/4 de tour sur le barillet; de cette façon, le bec d'ancre sus-mentionné demeure bien accroché à cette pièce. Mais, EN BAS DE REMONTAGE, la chaîne se trouve totalement déroulée de dessus la fusée. Cette dernière circonstance justifie la

nécessité de relier la chaîne à la fusée suivant la disposition expliquée plus haut. — Quoi qu'il en soit, à mesure que le grand ressort se déroule, la chaîne passe, dans le sens de la flèche φ, de dessus le tronc de cône de la fusée sur le pourtour du barillet. Celui-ci entraîne dès lors ledit tronc de cône, et met en mouvement une roue dentée D, dite *roue de fusée*, montée sur l'axe de ce dernier du côté de sa grande base, et qui s'endente avec le premier pignon du rouage. Le déroulement détermine, *ipso facto*, une diminution d'énergie dans l'action du grand ressort, diminution qu'on limite d'ailleurs ainsi qu'il est expliqué au n° 3. Mais grâce à la fusée, le grand ressort agit sur un bras de levier qui va en augmentant; il s'ensuit que le couple impulsit qui met en mouvement le rouage, demeure sensiblement d'intensité constante, et produit un travail moteur qui est à chaque instant à très-peu près égal au travail engendré par les frottements du mécanisme.

Dans les montres ordinaires, du moins dans celles d'aujourd'hui, il n'existe pas de fusée. C'est le barillet qui communique directement son mouvement au rouage. Quelques artistes, à la suite de Pierre Leroy, ont adapté une semblable combinaison aux chronomètres; mais cette pratique a fini par être abandonnée.

— En tout état de cause, comme, même avec une fusée, l'égalité *mathématique* entre les travaux moteurs et résistants par intervalles donnés, ne saurait être réalisée, et qu'elle est nécessaire pour que le mouvement du rouage soit, sinon uniforme, au moins *périodiquement uniforme*, lesdites dispositions ont besoin d'être complétées par l'adjonction d'un *régulateur*.

Le *régulateur*, que nous décrivons en détail aux n°s 5 et 6, est un balancier ou volant doué d'un mouvement circulaire alternatif produit par un ressort en acier roulé sur lui-même, et appelé *spiral*. Le spiral vibre de part et d'autre de sa forme d'équilibre, comme un pendule oscille de part et d'autre de la verticale.

Le *moteur* et le *régulateur* exercent leur action l'un sur l'autre par l'intermédiaire d'un mécanisme plus ou moins complexe, qui forme ce qu'on appelle l'*échappement*. L'échappement, expliqué *in extenso* au n° 4, a deux buts bien précis : modérer le mouvement du barillet, en le suspendant périodiquement; et faire restituer à chaque oscillation, par le moteur au régulateur, une certaine quantité de force vive, pour réparer celle que ce dernier perd pendant le même temps.

Grâce à ces combinaisons, on parvient, en principe, à produire des oscillations de durées aussi égales que possible, et d'ailleurs indépendantes des amplitudes des oscillations du balancier, qui sont ainsi mises à même de différer d'étendue sans influer sur la régularité du mouvement. On obtient dès lors un mouvement *périodiquement uniforme* pour les aiguilles que commande le rouage, et qui indiquent sur le cadran la mesure du temps.

—Ajoutons aux renseignements précédents que le prix des chronomètres est extrêmement variable. Il dépend surtout de la réputation du constructeur.

Au commerce, il ne dépasse pas 800 à 1.000 francs. Mais les gouvernements payent les bons chronomètres, après *expériences* et *concours*, jusqu'à 1.800 à 2.000 francs, et accordent en outre des primes aux instruments hors ligne (n° 29). Ils ont ainsi en vue d'encourager un *art*, dont les produits ont un trop faible débouché pour rémunérer suffisamment les fabricants.

N° 9. Description particulière du rouage. — Le *rouage* des chronomètres est d'une grande simplicité; et la *fig.* 1 le représente dans tous ses détails. Mais pour bien comprendre ce qui suit, il faut d'abord savoir que les axes et les pignons sont toujours de la même pièce de métal, sauf pour le *pignon de renvoi* de la minuterie, décrit ci-après en son lieu et place. Cela entendu, voici, par ordre explicatif, la description du rouage.

La roue de fusée D‴, *fig.* 1, engrène avec un pignon E, appelé *pignon de centre*, sur l'axe duquel est fixée une roue E′, dite *grande moyenne* ou *roue de centre*, qui fait un tour à l'heure.

Cette roue commande le pignon G, dit *pignon de petite moyenne*, sur l'axe duquel est montée une nouvelle roue G′, la *petite moyenne*, qui entraîne à son tour un pignon H concentrique à la *roue de secondes* H′, et appelé *pignon de secondes*.

La roue de secondes H′, qui fait un tour par minute, s'endente avec le *pignon d'échappement* K, dont l'axe porte la roue d'échappement K′. D'autre part, le prolongement de cet axe se termine par un long pivot, sur l'extrémité duquel est montée l'aiguille des secondes φ''.

Les parties précédentes du rouage sont renfermées entre deux plaques A, A_1, appelées *grande* et *petite platines*. Ces plaques sont maintenues parallèlement entre elles à l'aide des piliers B, B. Cet

ensemble forme les bâtis du chronomètre, et sert à *encager* les divers axes.

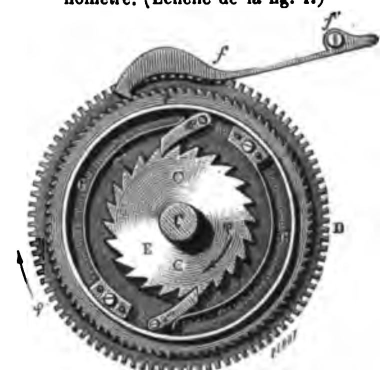
L'axe *e*F de la grande moyenne, dit *axe à longue tige*, traverse la platine A, la plus proche du cadran, puis le cadran lui-même. Dans l'intervalle existant entre ces deux parties, est installé un rouage particulier appelé *minuterie*. Le but de ce rouage est : 1° de permettre la mise à l'heure de ces aiguilles, sans produire de mouvement dans le mécanisme; 2° de faire mouvoir concentriquement les aiguilles des heures et des minutes, φ et φ'. Pour obtenir le premier effet, l'aiguille des minutes φ', au lieu d'être adaptée directement à l'*axe à longue tige*, est fixée à un canon ajusté à frottement sur cette pièce. Mais ce frottement est assez doux pour permettre de déplacer l'aiguille sans entraîner ledit axe, et sans produire de mouvement dans les parties du rouage que nous avons décrites. En second lieu, pour faire mouvoir l'aiguille des heures φ concentriquement à l'aiguille des minutes, on l'adapte à un autre canon *extérieur* au précédent, tournant librement autour de lui, et dont l'extrémité déborde le cadran. Ce canon porte une roue dentée f', *la roue d'heures*, que commande un pignon f, dit *pignon de renvoi*, monté *librement* sur un axe parallèle à *l'axe à longue tige*, et vissé dans la grande platine A. Ce pignon porte une *roue de renvoi* F′, qui engrène elle-même avec le *pignon de chaussée* F, dont le canon porte l'aiguille des minutes. — On comprend dès lors, en suivant en sens inverse la nomenclature précédente, que les mouvements de l'aiguille des minutes, qu'ils soient produits par le rouage ou par une cause extérieure, se transmettent à l'aiguille des heures avec la réduction voulue. Cette réduction est du reste produite en choisissant convenablement le nombre des dents des deux roues et des deux pignons dont on vient de parler.

Dans la plupart des chronomètres, les roues des heures et des minutes sont concentriques. Il y a pourtant quelques montres marines, particulièrement celles de Vissière, dans lesquelles chaque aiguille a son cadran distinct. La disposition de la minuterie est alors plus simple; mais le principe reste le même.

N° 3. Description particulière du mécanisme de remontage et du système de bandage du grand ressort. — Il importe que l'opération du remontage, en supprimant pendant quelques instants la force motrice, n'empêche pas les rouages de continuer leur mouvement. Voici comment on y parvient :

Une roue à rochet E, *fig.* 5, fait corps avec la fusée à l'aide de deux vis dont on aperçoit les emplacements sur le dessin. Ce rochet, au lieu d'agir directement sur la roue dentée D formant la base de la fusée, n'agit sur cette roue que par l'intermédiaire d'une seconde roue à rochet F, dite *grand rochet*, dont les dents sont tournées en sens contraire. — Lorsque le ressort moteur tend la chaîne et fait tourner la fusée dans le sens des flèches φ, la roue à rochet E tourne dans le même sens, et entraîne F, à l'aide des cliquets *e*, *e*, maintenus par les ressorts de rappel *e'*, *e'*. Cette dernière roue F a des dents, qui passent ainsi successivement sous le long ressort-cliquet *f*, sans être nullement gênées par cette pièce. Le ressort *f*, grâce à sa grande longueur et à la fixité en *f'* de sa seconde extrémité, joue en même temps le rôle de *linguet* et de *ressort de rappel*. — De son côté, un fort ressort auxiliaire G, logé dans l'épaisseur de la roue de fusée D, est fixé, d'un bout, à la roue d'engrenage D, et de l'autre, au *grand rochet* F. Ce rochet, mis en mouvement comme il a été dit ci-dessus, tire celle des extrémités du ressort G qui lui est fixée. Ce dernier, se trouvant de la sorte tendu, entraîne à son tour la roue D, pour la faire tourner dans le même sens que tout le reste de la fusée, soit dans le sens des flèches φ.

Fig. 5. Mécanisme de remontage de chronomètre. (Échelle de la fig. 1.)



Lorsqu'on veut *remonter* l'instrument, on agit à l'aide d'une clef sur le carré, vu en *c*, *fig.* 3, ménagé à l'extrémité de l'arbre C, qui est du reste aminci et forme pivot dès sa sortie du corps de la fusée. On fait ainsi tourner cette dernière pièce et par suite la roue E, *fig.* 5, en sens inverse des flèches φ. Le *grand rochet* F ne peut pas alors suivre ce nouveau mouvement, à cause du cliquet *f* qui l'en empêche. L'extrémité du ressort G fixée à F ne pouvant rétrograder, la tension de ce ressort s'exerce pour tirer, par sa seconde extrémité, la roue D dans le sens des flèches φ. Conséquemment la montre ne cesse pas de marcher dans ce sens. — Le ressort G peut ainsi entretenir seul le mouvement des rouages et des aiguilles pendant quelques minutes, jusqu'à ce qu'on ait eu le temps de remonter complétement la montre.

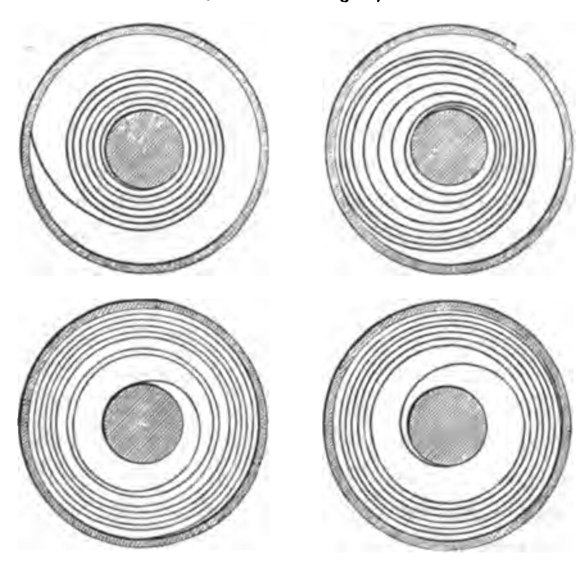
Lorsque ensuite le ressort moteur reprend son action, il restitue au ressort G la tension qu'il a perdue pendant le remontage. — Il nous reste à ajouter que le carré de remontage de la fusée est, en général, enveloppé d'un canon fixé sur la *petite* platine, et venant émerger sur le dessus du fond de la boîte. Cette disposition, qu'on aperçoit *fig.* 2, a pour but d'empêcher la poussière de pénétrer à l'intérieur du mécanisme, par le trou qu'on est obligé de ménager dans ledit fond pour le passage de la clef de remontage, et qu'on ferme d'ailleurs par un disque, tournant autour d'une goupille le traversant en un de ses points. Parfois, ce disque existe seul, c'est-à-dire sans l'adjonction du canon sus-mentionné.

Dans les montres sans fusée, dites *à barillet denté*, le remontage s'effectue en faisant tourner l'arbre du barillet. A cet effet, un rochet de même morceau que ledit arbre, et dont les dents sont retenues par un ressort-cliquet, empêche que cet arbre ne se déroule de lui-même, et force le barillet à dépenser le bandage du ressort. Le sens du remontage de l'arbre étant le même que celui du mouvement du barillet, la force motrice ne se trouve pas suspendue par cette opération.

—Occupons-nous maintenant du *système de bandage* du grand ressort. En principe, celui-ci *complètement bandé* doit pouvoir se détendre de 8 tours 1/2 environ, sans d'ailleurs que les spires se touchent à aucun moment. Ce nombre de tours est de plus de 1/3 trop grand pour réaliser les 54 heures de marche, qu'on exige en général des montres marines, afin de leur laisser encore 6^h de fonctionnement après deux jours d'oubli de remontage. On peut ainsi réduire, dans des limites suffisamment restreintes, du commencement à la fin desdites heures de marche, les *variations de la force motrice*, étant tenu compte d'ailleurs du changement de longueur des bras de levier successifs (n° 1) formés par la fusée. Il y a dès lors moyen de compenser ces variations par le jeu de l'échappement. Il faut pour cela que le ressort ne se débande que de 5 tours *moyens* à peu près, en ayant d'ailleurs de 1/2 tour à 1 tour d'*armure* EN BAS DE REMONTAGE, c'est-à-dire (n° 1) lorsque la chaîne est totalement déroulée de dessus la fusée, et 1 tour 1/2 à 2 tours *de bandage non utilisés* EN HAUT DE REMONTAGE, c'est-à-dire au moment où la croix d'arrêtage δ', *fig.* 1, borne le remontage, et où, ainsi que nous en avons prévenu audit n° 1, la chaîne doit encore se trouver enroulée de 1/4 de tour sur le barillet de remontage. Comme ce n'est que par exception

que les chronomètres sont appelés à marcher $54^h = 2^j,25$, et qu'en principe le jeu du ressort est destiné à s'effectuer en 24^h, il reste, au bout de chaque jour, un nombre de tours de *bandage non utilisé* valant de 1/2 tour à 1 tour plus $\frac{5}{2,25} \times 1,25 = 2^t,8$, soit en tout $3^t,3$ à $3^t,8$. En résumé, dans le *fonctionnement habituel*, le grand

Fig. 6. Grand ressort de chronomètre vu aux principales phases de son déroulement complet. (Échelle de la fig. 1.)



ressort ne se déroule que de $(5^t - 2^t,8) = 2^t,2$, avec $3^t,3$ à $3^t,8$ de *bandage non utilisés* EN BAS DE REMONTAGE journalier, et 1/2 à 1 tour d'*armure* EN HAUT : or ce sont là les meilleures conditions pour que le ressort agisse avec sa *plus parfaite égalité*. Quoi qu'il en soit, cette pièce, en se débandant entre les deux limites extrêmes de son déroulement, passe par les diverses phases représentées sur les différentes vues de la *fig.* 6.

Il faut maintenant expliquer le mode d'action de l'*étoile d'arrêtage* δ', *fig.* 1. Que l'axe *d* tourne dans un sens sous l'effort de la clef de remontage, ou qu'il détourne en sens contraire, pendant le fonctionnement, sous l'entraînement de la fusée, le *doigt d'arrêt* δ fait évidemment mouvoir, à chaque tour dudit axe, l'étoile δ' d'un angle égal à l'angle au centre qui s'étend d'une de ses entailles à

la suivante. D'après la manière dont sont façonnées et les entailles et l'extrémité libre du *cliquet d'arrêtage* δ'', cette dernière pièce ne s'oppose pas au mouvement précédent; et maintient l'étoile δ' immobile dans chaque intervalle de deux tours consécutifs. Mais dès que toutes les entailles ont été poussées, aussi bien dans un sens que dans l'autre, par le doigt δ, et que celui-ci arrive en contact avec le pourtour extérieur de la partie pleine de l'étoile, il y a *arc-boutement*, et par suite *arrêt forcé* de la rotation dans le sens où elle était en train de s'effectuer. — Toutefois cet arrêt ne se produit que dans le sens du remontage. En sens contraire, par suite du nombre d'entailles habituel de l'étoile, ce n'est pas à l'aide de celle-ci qu'a lieu l'arrêt; car le déroulement total de la chaîne de dessus la fusée est terminé avant que l'étoile ne forme arc-boutement; et alors c'est le point d'attache de la chaîne au barillet qui sert d'arrêt.

— On conçoit d'après ce qui précède que, quand on règle le chronomètre, il faut, après l'avoir remonté des 5 tours convenus à partir du point de débandage du grand ressort borné, comme il vient d'être dit, et qui correspond à tout le déroulement de la chaîne de dessus la fusée, donner audit ressort un surcroît de tension de 1 tour 1/2 à 2 tours. Ce surcroît de tension prend le nom spécial d'*armure*, que nous avons déjà employé plusieurs fois. — Pour obtenir l'*armure voulue*, l'arbre du barillet, auquel se trouve accroché un des deux bouts du grand ressort, au lieu d'être fixe d'une manière immuable, peut être tourné à l'aide d'une clef venant s'emmancher sur un carré ménagé à son extrémité libre, comme on le voit en *a*, *fig.* 3. On l'arrête alors à diverses positions, en choisissant dans chaque cas celle qui donne une *bonne armure*. L'arrêt s'obtient au moyen d'une roue à rochet encastrée sur ledit arbre, et que commandent un ou deux linguets montés sur la petite platine.

C'est l'ensemble de cette roue γ et de ses linguets γ', γ', qu'on aperçoit en *fig.* 1, à l'extrémité libre de l'arbre du barillet, qui forme *le système de bandage*.

N° 4. Description particulière de l'échappement. — En principe, tout *échappement* (n° 1) comporte une roue dite d'échappement, montée sur l'axe d'un pignon, qui la met en corrélation avec la dernière roue du *train d'engrenages*. Les dents de la roue d'échappement ont une taille spéciale. C'est de la manière dont la corrélation est établie entre cette roue et le balancier que dépend l'espèce d'échappement.

Il est peu de parties de la mécanique appliquée qui aient autant exercé le génie et la sagacité des artistes que cette corrélation. Nous distinguerons particulièrement ici les *échappements libres*. Leur caractère principal consiste en ce que le balancier opère sa vibration dans une indépendance à peu près complète de la roue d'échappement, avec laquelle il n'a de contact que pendant un moment presque instantané de chaque double oscillation.

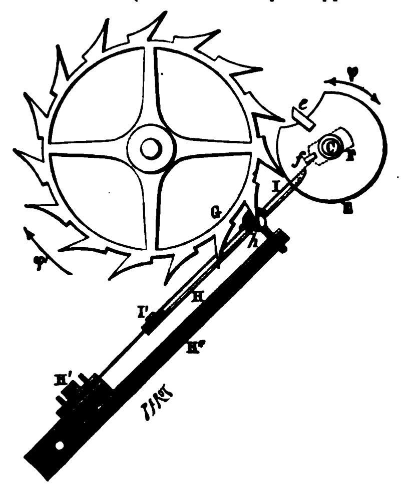
Dans les chronomètres, on emploie exclusivement l'échappement libre dit *à détente*, qui se divise en deux sortes : *à détente à ressort* représentée *fig.* 7, et *à détente sur pivot;* ce dernier genre est aujourd'hui abandonné par les constructeurs sérieux.

— Dans la *détente à ressort*, la roue d'échappement G choque une fois à chaque double oscillation du régulateur, un tenon en rubis *e*, dit *levée*, incrusté dans un *plateau* en acier E, qui est fixé lui-même perpendiculairement à l'axe C du balancier. La saillie et l'inclinaison de la levée sont combinées avec la forme des dents de la roue d'échappement, de la manière suivante : lorsqu'un des rayons géométriques de cette roue mené du centre à l'extrémité d'une dent vient passer par l'axe du balancier, la dent imprime à la levée une impulsion ; et, au contraire, quand un des rayons géométriques de la roue d'échappement qui rencontre l'axe du balancier, correspond au vide entre deux dents, il n'y a aucun contact.

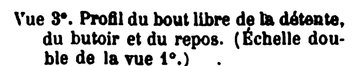
D'autre part, le système qui lâche et retient périodiquement la roue d'échappement, et par suite le barillet, est une *détente* formée d'un long levier H susceptible d'osciller autour d'un point fixe H′, attenant au pont de détente H″, et auquel il est relié par une partie amincie formant ressort de rappel. Le levier tend ainsi à être sans cesse ramené à sa position d'équilibre. Cette position est nettement déterminée à l'aide d'un *butoir k*, *vue* 2°, formé d'une vis, à tête ronde et fendue. Cette vis s'implante dans l'extrémité libre du pont de détente H″, laquelle extrémité porte à cet effet un trou taraudé, pratiqué au bout d'une fente qu'on aperçoit en *vue* 3°, et qui permet de resserrer au besoin le trou en question. Le levier H vient se coller sans cesse contre la tête de la vis, par l'intermédiaire de la base de la pièce *h*, dès qu'il est abandonné à lui-même. — Cette pièce *h*, que le levier porte vers les 3/4 de sa longueur, est un *repos* en rubis. Elle forme une sorte de cheville, dont la base joue le rôle sus-mentionné, et dont la partie en saillie chanfreinée à son extrémité supérieure, sert d'arrêt à une des dents de la roue d'échappement, chaque

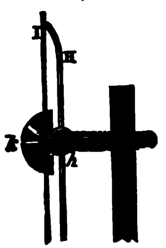
fois que le levier H est à sa position d'équilibre. — Par ailleurs, ce levier H est doublé, sur la plus grande partie de sa longueur, par un

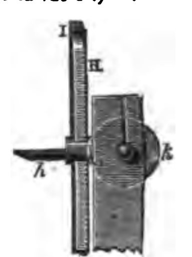
Fig. 7. Échappement de chronomètre.
Vue 1°. Plan d'ensemble. (Échelle double par rapport à la fig. 1.)



Vue 2°. Plan du bout libre de la détente, du butoir et du repos. (Échelle double de la vue 1°.)


Vue 3°. Profil du bout libre de la détente, du butoir et du repos. (Échelle double de la vue 1°.)





petit ressort en or I. Ce ressort, dit de *dégagement*, est fixé au levier en I' du côté du point d'oscillation de celui-ci; et son deuxième bout vient seulement appuyer sur l'extrémité libre du levier, qui est courbée à cet effet; il dépasse d'ailleurs cette extrémité. Le bout en question est heurté deux fois à chaque double oscillation du régulateur, qu'indique du reste la flèche à double bec φ, par un petit *doigt f* en rubis encastré dans un petit manchon de forme oblongue F, dit *rouleau*, monté, de même que le *plateau* E, sur l'axe C du balancier.

Grâce à la disposition que nous venons de décrire, le ressort de dégagement I n'actionne le levier H, et par suite ne dégage la roue

d'échappement G d'avec le *repos h*, en la laissant du reste partir dans le sens de la flèche φ', qu'à celui des deux heurts du balancier qui correspond sur *notre figure* à une rotation de droite à gauche, c'est-à-dire en sens inverse du mouvement des aiguilles d'une montre. Au second heurt, ledit ressort ne fait que fléchir en laissant se dégager le doigt en rubis sus-mentionné *f*.

— En *résumé*, les fonctions de l'échappement à détente à ressort se réduisent à ceci :

Le balancier vibrant de droite à gauche, à un certain moment le *doigt de dégagement f* écarte la détente de sa position d'équilibre, et *dégage* le repos *h*. La roue G, devenue libre, s'échappe dans le sens de la *flèche* φ'. Mais à ce moment, l'une des dents de la roue d'échappement rencontrant la *levée e*, imprime au balancier une violente impulsion de droite à gauche. — Un instant après, le balancier, ramené par le spiral de gauche à droite, vibre *librement*, sans aucun autre contact avec le système de la détente, que sa rencontre avec le ressort de dégagement I, auquel il fait subir une flexion presque insensible.

Il nous reste à dire qu'on désigne sous le nom de *levée d'échappement*, l'arc de cercle que parcourt le plateau E du balancier pendant le contact de la roue d'échappement avec la *levée e* qui est montée sur ce plateau.

— Il n'y a donc bien, ainsi que nous l'avons annoncé au début, *échappement* qu'à chaque double oscillation du régulateur, et quand le balancier tourne dans un même sens déterminé. En ceci, les chronomètres se distinguent des montres ordinaires à *cylindre* ou à *ancre*, dans lesquelles l'échappement se fait à chaque oscillation simple, comme dans les pendules, particularité qui les classe dans la catégorie des échappements à coup perdu.

On voit encore que l'échappement que nous venons de décrire porte à juste titre le nom d'*échappement libre*, puisque, sauf les instants très-courts des chocs de la roue d'échappement G contre la *levée e*, et des heurts du *doigt f* contre le ressort de dégagement I, le balancier oscille *librement*. Ces chocs ont du reste peu d'intensité, à cause de la faible masse de ladite roue et de la résistance minime du ressort en question.

L'avantage le plus apprécié de l'*échappement libre*, c'est que les actions mutuelles entre cet organe et le balancier étant des chocs, et non des frottements, on n'a pas besoin d'huile au contact. Or l'épais-

sissement de cette substance (n° 7) est une des principales causes de l'irrégularité des montres.

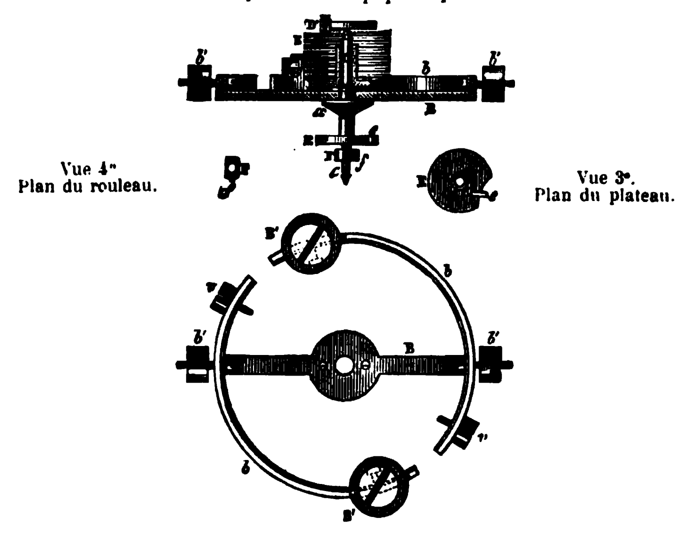
N° 5. Description particulière du balancier. — A côté de l'échappement, la constitution du *régulateur* lui-même (n° 1) occupe une place non moins importante. Cette constitution, qui comprend à la fois celle du balancier et du spiral, doit être combinée avec l'espèce de l'échappement, de façon à réaliser, pour le balancier, des oscillations jouissant de la propriété essentielle d'être toutes d'égale durée, en étant néanmoins susceptibles de varier plus ou moins notablement d'amplitude : c'est cette propriété qu'on désigne sous le nom d'*isochronisme*.

Sa nécessité provient de ce qu'il n'y a pas moyen de rendre mathématiquement identique, pour une même position du balancier, la résultante de toutes les forces tant actives que résistantes qui l'actionne à chaque vibration, et cela non-seulement d'une oscillation à l'autre, mais surtout d'une époque à une autre : cette dernière circonstance étant due (n° 23) à l'influence de la température sur le moment d'inertie du régulateur, et à l'influence sur la mobilité de celui-ci de l'épaississement des huiles qui lubrifient les pivots.

— Le balancier, *fig.* 8, de tout chronomètre, comprend, en principe, les pièces suivantes :

Fig. 8. Balancier de chronomètre. (Même échelle que fig. 1.)

Vue 1°. Élévation du balancier et du spiral, avec coupe par un plan mené suivant leur axe commun.



Vue 2°. Plan du balancier, avec coupe dans les masses compensatrices.

1° Un axe en acier *c* terminé par deux pivots. Cet axe est monté librement entre la petite platine et l'espèce de potence appelée *coq*, adaptée sur cette platine. Ledit axe est muni du *plateau* E et du *rouleau* F, qui portent (n° 4) les deux appendices en rubis *e* et *f*, destinés, l'un à recevoir l'impulsion de la roue d'échappement, et l'autre à dégager la détente.

2° Une pièce transversale en acier B, dite *barrette*, qui s'emmanche à angle droit avec l'axe *c*, et se fixe, à l'aide de vis, sur un épaulement *a* de même morceau que *c*.

3° Deux lames courbes formant un peu moins d'une demi-circonférence, et dont chacune fait corps, aux environs d'un de ses bouts, avec l'une des extrémités de la barrette. Ces lames, dites *bi-métalliques*, sont formées intérieurement d'acier et extérieurement de laiton. Elles servent à *compenser* le balancier, c'est-à-dire à rendre autant que possible (n° 18) son moment d'inertie indépendant de l'influence des variations de température. — Autrefois on exécutait séparément les lames d'acier et de laiton; et on les rivait ensemble par de nombreux points de leur surface. Mais elles se trouvaient ainsi réunies imparfaitement; et les dilatations manquaient de régularité et de continuité. Aujourd'hui les deux lames font corps ensemble. Pour obtenir ce résultat, on commence par façonner au tour un cylindre plein en acier. Ce cylindre, dont le trou central a été soigneusement bouché avec un morceau d'ardoise, est placé dans un creuset et entouré de laiton qu'on amène à la fusion, et qui ensuite, par le refroidissement, fait corps avec l'acier. Dans la masse ainsi obtenue, on découpe au tour un anneau *bi-métallique*, en réservant la barrette. Enfin, des traits de scie séparent l'anneau en deux arcs.

4° Deux masses en laiton B′, B′, dites masses *compensatrices* ou *de compensation*, fixées le long des lames bi-métalliques, de façon à se trouver en des points diamétralement opposés par rapport à l'axe du balancier.

5° Deux écrous *b′*, *b′*, dits *masses régulatrices* ou *écrous de réglage*, montés sur des vis en acier aux deux extrémités de la barrette B, et destinés à être rapprochés ou éloignés de l'axe à volonté.

6° Quelquefois des *vis supplémentaires de réglage v*, *v*, venant ajouter leur action à celle des masses précédentes, et s'adaptant aux environs de ces masses, vers l'extrémité des lames bi-métalliques voisines de la barrette.

Les pièces 4°, 5° et 6° servent au réglage du chronomètre, ainsi qu'il est expliqué aux n°s 19 et 20.

Le tout doit être disposé de façon que le centre de gravité du système passe constamment par l'axe de rotation.

— Le balancier circulaire qui vient d'être décrit est de beaucoup le plus usité. Ce n'est pourtant pas qu'il soit parfait ; mais les facilités relatives d'exécution et de réglage qu'il offre l'ont fait préférer par la plupart des artistes. Toutefois beaucoup de ceux-ci y adaptent certaines dispositions destinées à modifier le mode de déplacement des masses compensatrices et régulatrices.

Le but de pareilles dispositions reposant sur des considérations propres au *réglage*, ne saurait être bien compris que quand on aura expliqué en détail cette importante opération. Nous ne les décrirons donc qu'ultérieurement (n° 21).

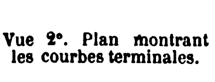
N° 6. Description particulière du spiral. — De son côté, le *spiral* S, *fig.* 9, est disposé au-dessus ou au-dessous du balancier, sous la forme d'un ressort long et délié, qui fait plusieurs révolutions autour de son axe de figure, et dont les extrémités sont attachées, l'une à une pièce fixe D', *fig.* 8, dite *piton* ou *tenon*, vissée au pont du balancier, l'autre à une *virole* en cuivre D enfilée sur l'axe du balancier.

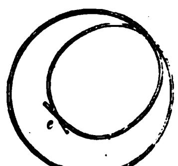
La présence du spiral fait que le balancier ne peut être en équilibre que dans une position particulière. Si on l'écarte de cette position, en le faisant tourner dans un sens ou dans l'autre, le ressort se déforme ; et, en vertu de son élasticité, il tend constamment à ramener le balancier dans sa position primitive. Dès que ce dernier, ainsi écarté de sa position d'équilibre, est abandonné à lui-même, le ressort le met en mouvement, et lui fait exécuter une suite d'oscillations autour de son axe.

Fig. 9. Spiral cylindrique de chronomètre, avec courbes terminales. (Échelle double par rapport à la fig. 1.)


Vue 1°. Élévation.




Vue 2°. Plan montrant les courbes terminales.



C'est à Huyghens qu'on doit l'heureuse idée de l'emploi du spiral en horlogerie. Le spiral

d'Huyghens était plat, c'est-à-dire avait toutes les spires dans un même plan, comme on le voit encore dans les montres ordinaires. — Depuis lors, Pierre Leroy a reconnu qu'en contournant cette pièce suivant une hélice à très-petit pas, de façon à former des circonférences de même rayon placées les unes au-dessus des autres, on pouvait obtenir d'une manière plus complète l'*isochronisme* des oscillations, même pour de grandes amplitudes. Ce ressort en hélice est employé spécialement dans les chronomètres, et est désigné sous le nom de spiral *cylindrique* ou héliçoïde. La section de ces spiraux est tantôt circulaire, tantôt rectangulaire.

Pour assurer aux spiraux un isochronisme aussi parfait que possible, leurs deux extrémités sont munies de *courbes terminales* symétriques, dont la forme se fixe théoriquement (n° 11). Toutefois, on peut encore parvenir à établir l'isochronisme sans de pareilles courbes, en choisissant convenablement la fraction de tour de chaque spire extrême (n° 13).—Il y a, d'ailleurs, des artistes qui emploient exprès des spiraux *anisochrones* (n° 17), c'est-à-dire manquant d'isochronisme en *eux-mêmes*. Ils combinent alors ce manque d'isochronisme avec le défaut de compensation du balancier, de façon à obtenir, somme toute, l'isochronisme de tout l'ensemble du régulateur.

— Les spiraux sont généralement en acier. Mais la difficulté de se procurer des rubans de ce métal homogènes et de composition bien définie, et en outre le désir de se mettre à l'abri de l'oxydation, ont engagé quelques constructeurs à employer des métaux que l'on obtient plus facilement à l'état de pureté. On a essayé avec un certain succès des spiraux en or. Récemment, le Dépôt de la marine a acquis plusieurs chronomètres de M. A. L. Berthoud pourvus de semblables spiraux. Jurgensen, de Copenhague, les a beaucoup employés. — Afin d'obtenir avec l'or une élasticité suffisante, on le trempe par refroidissement lent, comme cela se pratique pour les tam-tams. On peut craindre que le peu de ténacité de ce métal ne nuise à la solidité des spiraux. L'expérience prolongée de la navigation permettra seule d'apprécier la question.

Mentionnons encore les spiraux amincis aux extrémités et employés par F. Berthoud et A. Bréguet. Cette pratique paraît se baser sur la remarque des physiciens, que les diapasons les plus isochrones sont ceux dont les branches ont la forme de solides de moindre résistance. Mais elle a l'inconvénient de produire des spiraux trop sensibles et sujets à dérangement.

Citons enfin, à titre de curiosité, les spiraux en hélice conique de Motel, les spiraux sphériques essayés en Suisse et le spiral *tria in uno* des Anglais, cylindrique dans sa partie moyenne, et avec courbes terminales formées en volutes, comme les spiraux des montres ordinaires.

N° 7. Indications spéciales sur la forme des dents d'engrenage, les pivots, les trous, les contre-pivots et les huiles, dans les chronomètres. — En dehors des dents de la roue d'échappement, qui ont leur forme déterminée (n° 4) en raison de leur objet spécial, toutes les autres dents des roues d'un chronomètre, et celles des pignons, qui, soit dit en passant, sont appelées *ailes* en horlogerie, appartiennent à l'engrenage à flancs.

Le défaut bien connu de cet engrenage, dû à ce qu'il ne se prête pas au déplacement possible des axes, est ici peu à redouter, parce que, d'après la nature des *trous*, le jeu des axes ne peut devenir appréciable qu'au bout d'une période considérable. Mais il existe un autre inconvénient auquel il n'y a pas moyen d'échapper; car, dans les montres, on est obligé d'employer des pignons d'un très-petit nombre d'ailes; et cela conduit à de grandes étendues pour les arcs de *retraite*, c'est-à-dire pour les arcs qui correspondent à la durée du contact au delà de la ligne des centres. Or il résulte de cette circonstance que l'augmentation graduelle, à partir du contact sur ladite ligne, des actions mutuelles entre les dents, prend trop d'extension, et par suite engendre une usure inégale, qui se trouve inévitable. — Au surplus, l'engrenage à développante de cercle ne serait pas, de son côté, admissible à cause de la convergence trop rapide des profils. — Quant à l'engrenage à lanterne, il est évident qu'il ne saurait figurer dans aucun mécanisme de précision.

D'autre part, l'épaisseur des *ailes* des pignons est prise égale au 1/3 du pas; celle des dents des roues se trouve par suite égale aux $\frac{2}{3}$ du pas, *moins* le jeu qui varie entre $\frac{1}{5}$ et $\frac{1}{10}$ du vide.

— Occupons-nous maintenant des axes de toutes les pièces tournantes du mécanisme.

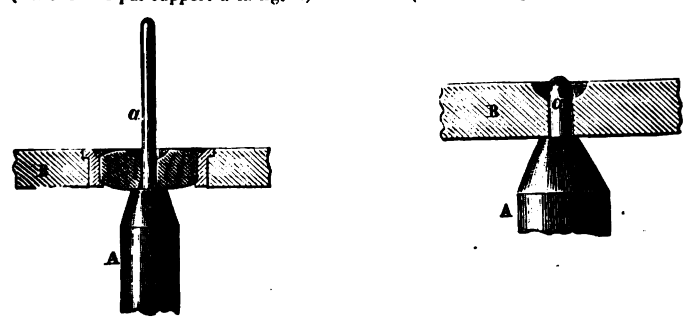
Nous avons, dans ce qui précède, donné au mot *axe* la signification générale qu'on lui attribue en mécanique. Mais, *en chronométrie*, les axes se désignent sous des appellations spéciales, suivant les pièces auxquelles ils appartiennent. Ils prennent le nom d'*arbre* pour le barillet et la fusée, de *tiges* pour toutes les roues du rouage, et d'*axe*

pour le balancier. — De leur côté, les extrémités des tiges du rouage et de l'axe du balancier s'appellent *pivots*.

Les pivots *a* de tige A, *fig.* 10 et 11, se composent généralement d'un tourillon dont l'épaulement, nommé *portée*, est formé soit par une zone annulaire, soit le plus ordinairement, comme le montrent les

Fig. 10. Pivot et trou en rubis de roue de seconde. (Échelle = 4 par rapport à la fig. 1.)

Fig. 11. Pivot et trou en cuivre de roue de centre (Échelle = 4 par rapport à la fig. 1.)

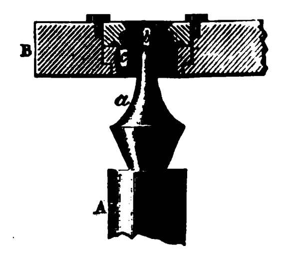


figures, par un tronc de cône qui se raccorde suivant la grande base avec le corps de l'axe. — Souvent il existe, en outre, un tronc de cône renversé, comme sur la *fig.* 12, de même base que le cône de l'épaulement, qu'il relie avec le corps de l'axe. Le but du tronc de cône renversé est d'empêcher l'huile de lubrifiage du pivot de s'épancher le long des tiges ou des dents du pignon monté sur ledit corps.

— Les crapaudines qui supportent les pivots sont appelées *trous*. Elles se trouvent évasées sur une certaine profondeur, de manière à former un petit godet destiné à recevoir l'huile, dont on ne met du reste que quelques gouttes pour trois ans. — Comme le graissage des organes ou le *renouvellement* des huiles ne doit se faire qu'à de longs intervalles, il importe de réduire, autant que possible, la masse des particules matérielles que le frottement détache du pivot et du trou, et qui ont pour effet d'épaissir et d'altérer les huiles, et par suite d'augmenter l'importance de cette résistance. C'est pourquoi on n'emploie presque exclusivement que des *trous c*, *fig.* 10, taillés dans des *rubis* qu'on incruste, dans les platines, telles que B, aux points de support des pivots. On évite également ainsi l'oxydation de l'huile par son contact avec le cuivre. — Les trous en *cuivre*, *fig.* 11, ne sont usités dans les chronomètres que pour les gros pivots des pièces mobiles qui fonctionnent avec lenteur.

En ce qui concerne le balancier, chacun des deux *pivots a*, *fig.* 12, de l'axe A, possède un système de *trou* formé de deux morceaux : l'un *b* est un anneau en rubis formant godet pour l'huile ; l'autre *c*, appelé *contre-pivot*, est une partie plate qui sert d'appui au pivot. Les *contre-pivots* sont en rubis ou en diamant. Par ailleurs, les deux sortes de pièces précédentes sont serties dans des bouchons en cuivre, qu'on loge et maintient dans la platine correspondante B, comme l'indique la figure.—De leur côté, les pivots eux-mêmes ont ici leurs bouts très-fins, comparativement aux autres pivots. C'est pour restreindre les frottements qu'on a recours à une pareille disposition ; car cette résistance passive a une plus grande influence sur le mouvement du balancier, en raison de la faible énergie du spiral, que sur le jeu de la transmission, qui, elle, est mise en mouvement par une force motrice plus que suffisante. Comme à la suite du moindre choc, les pivots ainsi construits pourraient se briser à leur naissance, on a soin de les renforcer, en les *raccordant* par un profil continu avec le cône renversé qui les précède le long de l'axe, et qui a le but sus-mentionné pour tous les pivots en général, de prévenir l'épanchement de l'huile. L'huile susceptible de se répandre s'étale ici le long du pivot et de son cône renversé. — Il reste à dire que l'évasement que l'on observe aux *trous* du balancier a pour objet d'empêcher tout frottement inutile dans un trou trop profond, et sert également pour retenir l'huile, qui cependant finit à la longue par occuper la partie plate du *contre-pivot*. Au surplus, ledit évasement facilite la mise en place de l'axe.

Fig. 12. Pivot, trou et contre-pivot d'axe de balancier de chronomètre, identiques pour les deux extrémités de l'axe. (Échelle = 4 par rapport à la fig. 1.)



— C'est surtout pour prévenir les usures et les grippements qu'on lubrifie à l'huile les pivots des diverses pièces mobiles. Le lubrifiage a bien encore pour but de diminuer les frottements.

Il importe de remarquer que pour les organes délicats du mécanisme, là où la force est peu considérable et la vitesse très-grande, l'effet *d'adhérence* de l'huile domine complétement l'effet du frottement. Par conséquent, pour ces organes, le second but du lubrifiage non-seulement n'est pas atteint, mais même les résultats vont à son encontre.—Au surplus, dans une certaine mesure, les frottements en eux-mêmes sont plutôt avantageux que nuisibles à la régularité du

mouvement des montres, en ce sens qu'on peut alors donner plus d'énergie au grand ressort, ce qui rend son action relativement plus uniforme. En un mot, ce ne sont pas tant les frottements en eux-mêmes qu'il faut redouter, mais *leur inconstance;* c'est pourquoi on ne lubrifie pas les dents mêmes du rouage. D'autant que si l'on faisait le contraire, on ne remplirait pas les conditions de propreté que nécessitent ces parties, afin de ne pas s'encrasser. — D'après ce que nous venons de dire, il est indispensable de prendre les mesures nécessaires pour que l'huile d'un pivot ne puisse pas pénétrer dans l'intervalle des dents du pignon voisin. Afin d'atteindre ce but, on se contente, dans les montres ordinaires, de creuser une petite rigole ou *piqûre* dans le pignon, suivant la circonférence de jonction avec l'arbre : on forme ainsi un réservoir destiné à emmagasiner l'huile qui peut sortir du trou. Mais dans les chronomètres, la piqûre circulaire est remplacée, ou même corroborée, par le tronc de cône renversé ménagé à la naissance des pivots, comme on en a prévenu plus haut.

Le choix des huiles est d'une extrême importance pour la bonne marche et la conservation des pièces d'horlogerie. Des huiles trop fluides se volatilisent et laissent s'user les pivots; des huiles trop grasses et trop oxydables opposent au mouvement trop de résistance, et, qui pis est, une résistance trop variable avec le temps et la température. C'est surtout aux pivots du balancier qu'il importe d'avoir des huiles excellentes. Pour les pivots des autres rouages, leur importance est relativement moindre ; là, en effet, la force motrice peut être augmentée suffisamment pour qu'on n'ait pas à s'inquiéter de sa diminution par les résistances passives, au moins au delà d'une certaine mesure.

Les horlogers considèrent l'huile comme l'ennemi intime de leurs instruments. C'est même souvent sur son compte que l'on rejette les vices d'un mécanisme mal conçu ou mal exécuté. Mais sans imputer à l'huile toutes les irrégularités qui peuvent affecter les chronomètres, nous constaterons qu'elle a une influence très-réelle et très-redoutable, surtout eu égard à ce qu'elle s'épaissit graduellement sous l'influence du mouvement des métaux qu'elle lubrifie, et par l'action de l'oxygène de l'air. — Avec les meilleures qualités de ce liquide, on est obligé de nettoyer le chronomètre *tous les trois ans*, si l'on veut pouvoir compter sur des marches régulières.

N° 8. Position du problème général de la théorie des chronomètres. — L'étude du fonctionnement des chrono-

mètres a fait le sujet de travaux remarquables, qui remontent à Huyghens et à Bernouilli, et de recherches expérimentales très-ingénieuses débutant avec Pierre Leroy.

Dans ces dernières années, MM. Phillips, Yvon Villarceau et Résal ont appliqué avec un grand talent les principes de la mécanique, l'un à l'étude particulière du spiral, l'autre à la théorie complète du mouvement et de la compensation des chronomètres, et le troisième à divers points de ces deux questions. L'étude de M. Phillips comprend un Mémoire inséré dans le *Recueil des savants étrangers*, divers détails complémentaires donnés dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, et enfin un Manuel pratique, qui est un résumé professionnel du Mémoire. De son côté, le travail de M. Villarceau a été inséré dans les *Annales de l'Observatoire de Paris*. Enfin, les points particuliers étudiés par M. Résal sont contenus dans le tome III de son *Traité de mécanique générale*.

Tout récemment, M. Caspari est venu apporter un contingent de nouvelles considérations à la théorie dont il s'agit, particulièrement en ce qui concerne le spiral. Ces recherches, pleines d'intérêt et qui complètent avantageusement tous les travaux antérieurs que nous venons de citer, se trouvent dans le 11e cahier des « *Recherches sur les chronomètres, etc.* », recueil publié par le Dépôt des cartes et plans de la marine.

D'après ce que nous avons dit au n° 1, le problème général de la théorie des chronomètres consiste à obtenir un mouvement périodiquement uniforme par l'*intermédiaire* du régulateur. Il suffit dès lors qu'il en soit ainsi pour ce dernier, en ne se préoccupant que secondairement de la relation entre la force motrice (grand ressort) et les forces résistantes (frottement du rouage), qui agissent sur le reste du mécanisme.

N° 9. Théorie du moteur dans les chronomètres. — Eu égard à l'éventualité d'imperfection dans l'isochronisme du régulateur, il vaut mieux se rapprocher autant que possible de l'égalité constante entre les travaux de la force du grand ressort, d'une part, et des forces résistantes du rouage, d'autre part : déduction faite d'ailleurs du travail consommé à chaque oscillation double par le choc de la roue d'échappement contre la *levée* du balancier. C'est ce qui explique l'usage de la fusée.

Toutefois, avec un régulateur parfaitement isochrone, on pourrait à la rigueur se contenter d'un moteur dont la force, sans être con-

stante, serait toujours suffisante pour entretenir le mouvement. C'est ce qu'a fait P. Leroy et, après lui, quelques horlogers, qui laissent (n° 1) le barillet agir directement sur le rouage, sans l'intervention d'une fusée. Cette disposition, appliquée à un spiral *non isochrone*, produit l'effet singulier de faire intervenir dans la marche une perturbation, qui a pour période l'intervalle entre les remontages. Un pareil instrument, observé tous les jours à la même heure, paraîtrait avoir une marche très-régulière. Mais cette marche ne serait pas constante pendant les vingt-quatre heures. Comparée, à douze heures d'intervalle, avec une pendule, la montre donnerait des résultats différents. C'est ce qui arrive assez fréquemment pour certains chronomètres de poche, dans lesquels on supprime la fusée afin d'en réduire le volume.

En résumé, dans les montres marines, la fusée est adoptée comme surcroît de précaution. Cette précaution étant prise, il résulte des considérations du numéro précédent, qu'on n'a pas à tenir compte du jeu même du grand ressort dans la théorie des chronomètres. Nous croyons néanmoins intéressant de donner sur ce jeu les détails suivants :

On a remarqué que la courbure des ressorts augmente avec le temps : ce n'est qu'au bout de deux ou trois ans qu'ils prennent une forme définitive d'équilibre.

De son côté, M. Résal a fait du ressort moteur une étude analytique et expérimentale très-complète. On la trouvera dans le tome III du *Traité de mécanique générale* de ce savant. Nous regrettons de ne pouvoir donner ici une idée des beaux développements analytiques que comporte cette question. Nous devons nous borner à en citer les résultats.

— Après avoir établi la loi de la détente du ressort, M. Résal a trouvé l'expression générale du moment de traction exercée sur la chaîne du barillet. En se servant de cette expression pour la détermination du profil théorique de la fusée, M. Résal a montré que, si le rayon de la grande base de la fusée est égal à celui du barillet : 1° la projection dudit profil sur le plan de cette base est une spirale d'une forme spéciale; 2° la méridienne de la surface de révolution que forme la fusée avant d'être entaillée, est une courbe convexe vers l'axe du barillet, qu'elle a pour asymptote. Ces formes sont à fort peu près celles que les artistes ont été conduits à adopter.

N° 10. Équation générale de la théorie du régula-

teur dans les chronomètres. — Étant admis que la théorie des chronomètres se résume dans celle de leur régulateur, il importe de commencer par préciser toutes les forces qui agissent sur cette partie du mécanisme. Ce sont :

1° La force extérieure qui retient l'extrémité libre du spiral; puis l'action que ressent, de la part du balancier, la deuxième extrémité de ce ressort; — 2° les forces élastiques du spiral, lesquelles comprennent implicitement sa réaction sur le balancier; — 3° les frottements de diverses sortes des pivots du balancier; — 4° la résistance que l'air offre au mouvement de celui-ci; — 5° l'impulsion périodique qu'il reçoit de la roue d'échappement; — 6° son choc contre la détente pour la soulever; — 7° l'adhérence des huiles due à leur défaut de fluidité, adhérence ayant le grave inconvénient de varier avec le temps et la température, et se faisant sentir aux pivots du rouage et du balancier, en affectant le jeu de la roue d'échappement dans l'énergie de son impulsion sur le balancier, d'une part, et dans la résistance que celui-ci lui oppose et qu'elle a à vaincre, d'autre part; — 8° enfin les forces d'inertie du balancier et du spiral.

Cela compris, appelons :

ω la quantité angulaire dont le balancier est *écarté* de sa position d'équilibre à l'instant t, cet écart étant exprimé en longueur d'arc dans la circonférence de rayon 1.

I et i les moments d'inertie du balancier et du spiral autour de l'axe de rotation; les quantités I et i sont susceptible de varier avec l'angle ω ; car, d'une part, l'ensemble du balancier change légèrement de configuration avec cet angle et sous l'action de la force centrifuge; et, d'autre part, le spiral subit, par sa nature même, des déformations qui dépendent également dudit angle. Mais surtout les deux quantités I et i peuvent ressentir l'influence de la température, eu égard à ce que celle-ci est apte à faire varier les distances au centre d'oscillation des diverses parties du balancier et du spiral, à moins que la compensation (n° 19) ne soit parfaite.

J l'expression générale du moment de chaque force extérieure mentionnée en 1°, appliquée au spiral, lorsque l'écart ω acquiert une valeur égale à l'unité angulaire.

K l'expression générale du moment des diverses espèces de forces élastiques (n° 12) qui se développent dans le spiral, lorsque l'écart ω acquiert une valeur égale à l'unité angulaire. Ce moment est variable dans une certaine mesure avec la température à l'instant considéré, eu égard à l'influence (n° 12) de la chaleur sur le coefficient d'élasticité du spiral.

k l'expression générale du moment d'une quelconque des forces 3° à 7° sus-mentionnées.

T le temps d'une oscillation simple.

Il est manifeste que, pour une valeur quelconque de ω, les moments des forces à considérer peuvent s'écrire sous la forme $J\varphi(\omega)$, $KF(\omega)$, $kf(\omega)$: $\varphi(\omega)$, $F(\omega)$ et $f(\omega)$ étant des fonctions de l'écart angulaire propre à chaque force considérée, et pouvant, suivant l'essence de celle-ci, se réduire à une constante. Or on voit, avec un peu de ré-

flexion, qu'il est licite de considérer, à chaque instant, l'ensemble du spiral et du balancier comme un ***système rigide***, sur lequel toutes les actions élastiques se réduisent à leurs résultantes respectives, telles que les donnent les lois de l'élasticité. Nous aurons dès lors, en vertu du théorème de d'Alembert, l'équation suivante, où on suppose I de grandeur constante, et où l'on néglige la valeur très-petite et très-complexe du terme en i destiné à tenir compte de l'inertie du spiral, en se réservant d'apprécier (nº 16) l'influence de ces hypothèses dans une étude plus approfondie :

$$\text{(I)} \qquad I\frac{d^2\omega}{dt^2} = \Sigma J\varphi(\omega) - \Sigma KF\omega + \Sigma kf(\omega).$$

Telle est l'équation générale de la théorie du régulateur dans un chronomètre. — Le but à atteindre est de combiner les forces dont on dispose, de façon que le temps T déduit de l'équation (I) soit constant, quelle que soit l'amplitude de chaque oscillation.

— Il est un cas très-simple où on obtient la solution désirable, c'est celui où I étant constant, le second membre se réduit à une quantité de la forme — Kω. On a effectivement, en pareille hypothèse :

$$I\frac{d^2\omega}{dt^2} = -K\omega.$$

Or cette équation différentielle s'intègre facilement en suivant la voie ci-après (*):

$$2I\frac{d^2\omega}{dt^2}d\omega = -2K\omega d\omega;$$

$$I\left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 = -K\omega^2 + \textit{constante}.$$

La vitesse angulaire $\frac{d\omega}{dt}$ devant s'annuler pour la valeur $\omega = \pm \omega_1$,

(*) Nous avons donné cette voie comme étant celle que connaissent les personnes qui n'ont vu que les éléments du calcul intégral. Mais il existe un procédé beaucoup plus élégant et plus court, qui dérive de la méthode générale de résolution des *équations différentielles linéaires* à coefficients constants et sans second membre. (On sait que les équations différentielles *linéaires* sont celles dans lesquelles la fonction inconnue de la variable indépendante et ses dérivées n'entrent qu'*au premier degré*, et ne se *multiplient pas entre elles*.)

Dans ledit procédé, on pose :

$$\omega = A \times \cos m(t - t_1),$$

en représentant par :

A et m deux *constantes*,

t_1 une valeur déterminée de t, que dans notre exemple nous prendrons pour repré-

ω_1 étant la demi-amplitude de chaque oscillation simple, on a évidemment :

$$constante = K\omega_1^2.$$

Dès lors il vient :

$$I\left(\frac{d\omega}{dt}\right)^2 = K(\omega_1^2 - \omega^2).$$

D'où :

$$dt = \sqrt{\frac{I}{K}} \times \frac{d\omega}{\sqrt{\omega_1^2 - \omega^2}} = \sqrt{\frac{I}{K}} \times \frac{d\left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2}};$$

$$t = \sqrt{\frac{I}{K}} \times \left(\text{arc sin} = \frac{\omega}{\omega_1}\right) + \textit{nouvelle constante}.$$

Or on a évidemment :

$$T = \left(\text{la val}^r \text{ de } t \text{ pour } \omega = \omega_1\right) - \left(\text{la val}^r \text{ de } t \text{ pour } \omega = -\omega_1\right) = \sqrt{\frac{I}{K}} \times \left[(\text{arc sin} = 1) - (\text{arc sin} = -1)\right];$$

soit enfin :

$$\text{(II)} \qquad T = \pi\sqrt{\frac{I}{K}}.$$

Donc le mouvement du régulateur est bien isochrone, dans l'hy-

---

senter l'instant où la vitesse d'oscillation s'annule, et où $\omega = \omega_1$, ce qui donne évidemment $A = \omega_1$.

De l'équation de départ ci-dessus, on tire :

$$\frac{d^2\omega}{dt^2} + Am^2 \times \cos m(t - t_1) = 0.$$

Identifions cette relation avec l'équation $\frac{d^2\omega}{dt^2} + \frac{K}{I}\omega = 0$, qu'il s'agit d'intégrer. Pour $t = t_1$, et conséquemment pour $\omega = \omega_1$, on trouve :

$$\frac{K}{I} = \frac{Am^2}{\omega_1}, \text{ et par suite } = m^2.$$

De là il vient :

$$m = \sqrt{\frac{K}{I}}.$$

Dès lors ladite équation de départ donne :

$$(t - t_1) = \frac{}{m} \times \left(\text{arc cos} = -\frac{\omega}{A}\right) = \sqrt{\frac{I}{K}} \times \left(\text{arc cos} = \frac{\omega}{\omega_1}\right).$$

En faisant, dans cette dernière relation, $\omega = -\omega_1$, la différence $(t - t_1)$ représentera évidemment le temps d'une double oscillation, soit T ; et on aura :

$$T = \sqrt{\frac{I}{K}} \times (\text{arc cos} = -1) = \pi\sqrt{\frac{I}{K}}.$$

pothèse spéciale où nous nous sommes placé, d'une valeur proportionnelle à l'écart angulaire pour le moment de toutes les forces qui l'actionnent, et d'une valeur constante pour son moment d'inertie.

Cette hypothèse, qui est *suffisante* pour la solution du problème en vue, n'est pas *indispensable* pour cette solution. En d'autres termes, celle-ci peut être réalisée dans d'autres conditions (n° 13). Quoi qu'il en soit, comme la seule force dont on dispose en réalité pour arriver au résultat voulu est l'*action du spiral*, on comprend que c'est de ce côté qu'ont dû se porter dès l'abord les efforts des savants qui ont traité la *question de l'isochronisme.* Aussi est-ce la théorie des spiraux qui a sollicité leur principale attention.

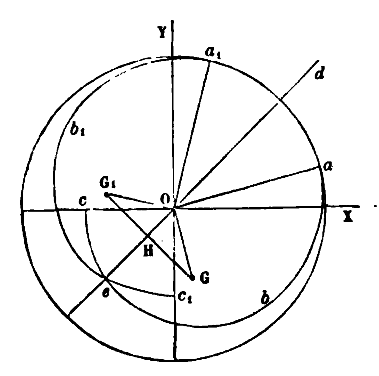
N° 11. Théorie des spiraux isochrones avec courbes terminales. — M. Phillips est le premier qui ait abordé à fond la théorie du spiral. Pour résoudre le problème de l'isochronisme à la manière de ce savant, on fait d'abord abstraction dans l'équation (I) du numéro précédent, des termes $\Sigma J\varphi(\omega)$ et $\Sigma kf(\omega)$.

A cet effet, on s'impose comme *première condition*, relativement accessoire du reste, que les deux forces extérieures actionnant les extrémités c et c_1, *fig.* 13, aient sans cesse un moment résultant nul. On parvient à ce résultat, en remarquant que, dans le système considéré, les points c et c_1 peuvent toujours être pris *à posteriori* à égale distance de O, et que les choses sont toujours combinables de façon que lesdites forces aient même intensité ainsi que même direction par rapport à leurs bras de levier respectifs Oc et Oc_1. D'ailleurs, le plus souvent le point d'attache de chaque courbe terminale, au lieu d'être son extrémité libre elle-même c ou c_1, est le point e, qui correspond à l'intersection des projections de deux courbes sur le plan perpendiculaire à l'axe du spiral, et qu'on aperçoit aussi en *vue* 2°, *fig.* 9.

Comme *seconde condition*, bien autrement importante que la première, et *fondamentale*, on se propose d'entre-détruire les actions élastiques *radiales du spiral* (n° 12), ce qui implique un couple nul de la part de ces forces, et une annihilation des frottements latéraux des pivots du balancier. On suppose, en outre, que les parties du terme général $\Sigma kf(\omega)$, *indépendantes* desdits frottements latéraux, sont négligeables, ce qui a été légitimé par M. Villarceau, sous de certaines réserves, toutefois, pour diverses de ces parties (n° 15). On admet ensuite que le moment d'inertie du spiral est négligeable vis-à-vis

celui du balancier, ainsi du reste que nous l'avons supposé pour l'équation générale (I).

Fig. 13, relative à la théorie des spiraux isochrones avec courbes terminales.



Ces hypothèses faites, il s'agit de déterminer la forme du spiral de façon que, outre la réalisation de la *seconde condition* sus-énoncée, elle conduise, comme *troisième condition* non moins *fondamentale* que la seconde, à rendre F(ω) égale à ω, et par suite de façon à obtenir l'isochronisme de la même manière que dans le cas traité à la fin du numéro précédent.

— L'étude de M. Phillips a porté aussi bien sur le spiral *plat* que sur le spiral cylindrique (n° 6). Nous nous bornerons, bien entendu, ici, à ce dernier spiral, qui est celui des chronomètres. La question se réduit alors à satisfaire aux conditions *deux* et *trois* susmentionnées, par la détermination de la forme qu'il conviendra de donner aux courbes *terminales abc* et $a_1b_1c_1$, *fig.* 13, du spiral, c'est-à-dire aux deux courbes destinées à relier les deux extrémités de celui-ci, d'une part, à la *virole* du balancier, et, d'autre part, au *piton* vissé au pont du balancier (n° 6).

Pour remplir la condition *deux*, il faut que le spiral s'ouvre et se ferme bien concentriquement à l'axe, en ne faisant que changer de rayon. Ce résultat s'obtient en choisissant deux courbes *terminales* symétriques par rapport à la bissectrice O*d* de l'angle des rayons menés aux encastrements, et jouissant en outre des deux propriétés très-simples que voici :

1° Le centre de gravité G (ou G_1) de chacune d'elles, doit se trouver sur la perpendiculaire OG élevée du centre O du spiral au rayon O*a* allant de ce centre au point *a*, où la courbe terminale se détache des spires.

2° La distance G_1G entre les deux centres précédents doit être une troisième proportionnelle au rayon des spires O*a* et à la longueur *abc* ou $a_1b_1c_1$ de chaque courbe terminale elle-même.

Notons, en passant, que, pour tracer par les points *a*, *c* (ou a_1, c_1), supposés donnés, une courbe jouissant de ces propriétés, on procède par tâtonnements géométriques, en modifiant successive-

ment une courbe tracée au jugé et normale au rayon Oa. Il va de soi qu'il y a une infinité de solutions, et que rigoureusement la forme obtenue ne convient que pour la distance considérée du point a par rapport au centre O, distance qui dépend de la position corrélative du balancier dans son oscillation.

Quoi qu'il en soit, on reconnaît qu'une fois la *deuxième* condition remplie à l'aide des courbes terminales dessinées comme il vient d'être dit, le centre de gravité du spiral tout entier se trouve en même temps, et *ipso facto*, sur l'axe du balancier. Ceci se voit en remarquant que le spiral peut être considéré comme composé : 1° d'un nombre entier de spires commençant et finissant en a; 2° des deux courbes terminales; 3° de l'arc aa_1. Or le centre de gravité des spires est évidemment en O; et en combinant les centres de gravité G et G_1 des courbes terminales avec celui de l'arc aa_1, on trouve aussi ce même point O. D'un autre côté, M. Phillips a établi que la *troisième* condition précitée était satisfaite, du moment que le *centre de gravité du spiral tout entier coïncidait sans cesse avec l'axe du balancier.* — Il suit de là que les deux conditions *fondamentales* voulues pour réaliser l'isochronisme des oscillations, au moins dans les hypothèses où s'est placé M. Phillips, se trouvent obtenues du *même coup* par une *même forme* déterminée des courbes extrêmes. D'ailleurs, le spiral s'ouvrant et se fermant concentriquement à son axe de figure, l'influence de l'inertie de ce ressort est à peu près annulée, et se trouve, du reste, à même de l'être encore davantage par une diminution du rayon des spires, ainsi que l'a démontré M. Caspari (n° 16).

La concomitance ci-dessus est d'une grande importance, en raison de ce que, si l'une des deux conditions *fondamentales* dont il s'agit n'est obtenue qu'à peu près, l'autre se trouve l'être aussi à peu près. Il en résulte pour *l'isochronisme* des oscillations, une réalisation incomparablement plus complète que si les choses se passaient autrement. — Ainsi, pendant que le balancier oscille, les courbes terminales se déforment un peu; et dans leurs déformations, elles ne satisfont pas constamment à la condition qui fait disparaître la pression de l'axe du balancier sur ses supports; car cette condition n'est rigoureusement réalisée, avons-nous prévenu plus haut, que pour une position déterminée du balancier. Mais d'après la concomitance dont on vient de parler, cette circonstance ne doit avoir qu'une influence insignifiante sur la durée des oscillations, surtout si les courbes en

question se déforment très-peu pendant que le balancier oscille, ce qu'on obtient en donnant à la partie héliçoïdale du spiral une grande longueur relativement à ces courbes.

N° 12. Équation de départ de la théorie des spiraux isochrones avec courbes terminales. Expression de la durée de leurs oscillations. — Nous ne reproduirons pas la savante analyse qui a conduit M. Phillips aux importants résultats que nous venons d'énoncer. Mais nous indiquerons la mise en équation du problème, en suivant pour cela une méthode un peu plus simple que celle de l'éminent académicien, auquel reste le mérite d'avoir été le premier à donner la solution de la question. Notre méthode se rapproche de celle qu'a suivie M. Résal dans le tome III de son *Traité de mécanique générale.*

Préalablement, étudions les diverses *actions élastiques* d'un spiral. Occupons-nous d'abord de son *moment d'élasticité.* — Lors de l'enroulement ou du déroulement d'un spiral, toute section normale à la longueur de celui-ci éprouve, par le fait du refoulement des fibres longitudinales du métal sur elles-mêmes d'un côté du ressort et de leur étirement de l'autre côté, une rotation autour d'une des fibres en hauteur occupant sa partie centrale, et qui est en principe parallèle à l'axe de déroulement ou d'enroulement. Cela compris, on appelle *moment d'élasticité*, le moment, par rapport à ladite fibre, des efforts que les forces moléculaires voisines de la section considérée, et qui constituent ici l'élasticité du métal, opposent au mouvement de cette section pour une rotation *fictive* égale à l'unité angulaire, en supposant d'ailleurs que le ressort en vue a 1 *mètre de long* au repos. On démontre expérimentalement que, pour un angle *réel* de rotation ne dépassant pas les limites de l'élasticité de la pièce, le moment y relatif est proportionnel à cet angle réel. L'expérience prouve encore que si le ressort a L^{m} de longueur au lieu de 1^{m}, il faut diviser le résultat par L, résultat que nous aurons à invoquer plus loin. — Soient maintenant :

z et u les coordonnées d'un point quelconque de la section d'un spiral par rapport à la fibre invariable de cette section prise pour axe des u, et d'une perpendiculaire à cette fibre prise pour axe des z ;

ε le *coefficient d'élasticité*, c'est-à-dire la traction en Kg par *m.c.*, correspondant à un allongement de 1^{m} subi par un ressort ayant lui-même 1^{m} de long au repos. Aux environs de 15° de température, ce coefficient vaut pour l'acier $20^{kg} \times (1000)^{2}$; mais il s'affaiblit à mesure que la température augmente, suivant une loi qui n'est pas connue.

D'après cette légende, l'expression générale du *moment d'élasticité*

E, entendu comme il en a été convenu plus haut pour une section considérée dans un ***ressort de 1 mètre de long***, est représentée par :

$$E = e \iint z^2 \, dz \, du = e \times \textit{moment d'inertie de la section par rapport à la fibre invariable de celle-ci.}$$

Conformément à cette formule, le moment d'élasticité d'un spiral de 1^m de long vaut $e \times \frac{\pi r^4}{4}$, pour une section circulaire de rayon r ; et $e \times \frac{ab^3}{12}$ pour une section rectangulaire, de hauteur a dans le sens de l'axe de déroulement et d'enroulement du spiral, et de longueur b dans le sens perpendiculaire audit axe. Dans tous les cas, le moment qui nous occupe devra, *in petto*, être regardé comme une fonction de la température, tant à cause des variations des dimensions de la section avec cet élément que du changement de e signalé dans la légende ci-dessus. Les deux effets ainsi produits sont de sens contraires. Mais, d'après l'expérience, le dernier l'emporte toujours de beaucoup sur le premier; et, en somme, ledit moment diminue avec la température.

Tout ce qui précède étant bien compris, appelons encore :

L la longueur totale du spiral;
s une longueur d'arc quelconque de celui-ci, abstraction faite de son épaisseur;
ρ, ρ_1 les rayons de courbure en un point de cet arc, lorsque le spiral est au repos, d'une part, et, d'autre part, lorsqu'il est déformé par suite de l'angle d'écart ω du balancier d'avec sa position d'équilibre;
θ, θ_1 les inclinaisons de ρ, ρ_1 sur l'axe OX, *fig.* 13.

Le spiral ayant son extrémité fixe en c et son extrémité libre en c_1, *fig.* 13, se trouve soumis d'un bout à l'arrêt que lui oppose le point de fixation, et, de l'autre bout, aux efforts du balancier; ces efforts donnent naissance aux diverses actions de l'élasticité du métal. Or, le spiral peut être regardé comme formé d'une série de petites tranches métalliques d'épaisseur ds, et dès lors existant au nombre de $\frac{s}{ds}$ dans la longueur s. Les actions élastiques consistent principalement en un couple provenant de la somme de tous les petits couples d'enroulement ou de déroulement se produisant entre chacune desdites tranches du spiral, comme il a été expliqué ci-dessus. — Il importe de remarquer que la longueur du levier Oc, formé par le rayon de la virole du balancier aboutissant au point d'attache du spiral, n'a aucune influence sur le moment du couple en question, qui commande le balancier. Cette longueur pourrait être nulle,

comme cela est même nécessaire (n° 18) pour mettre le fonctionnement du spiral complétement à l'abri des déformations particulières de celui-ci dues aux variations de la température. Afin d'éviter les idées fausses, on ne saurait trop insister sur ce fait, dont la raison d'être réside d'abord dans l'annulation sans cesse ménagée entre eux (n° 11), des moments des forces extérieures qui actionnent les deux extrémités du spiral ; et en second lieu, dans le droit (n° 10) de considérer, pour chaque position du régulateur, les actions élastiques exprimées conformément aux lois de l'élasticité, comme agissant sur l'ensemble du spiral de la même manière que si c'était un corps rigide.

En tout état de cause, lesdites *actions* élastiques comprennent aussi la résistance au glissement que les tranches tendent à éprouver les unes par rapport aux autres, et qui donnent lieu à des forces *radiales*. — Il y aurait encore à la rigueur à considérer l'intervention de l'élasticité s'opposant à un écartement des tranches, et qui correspond à l'allongement même du ressort. Mais cet allongement étant tout à fait négligeable, nous n'avons pas à nous occuper de cette troisième espèce de force élastique.

— D'après la *deuxième* condition du n° 11, la forme du spiral doit être telle, que les forces élastiques *radiales* s'annulent entre elles. Dès lors, le terme $KF(\omega)$ de l'équation générale (I) du n° 10 ne doit comprendre que le couple général d'enroulement ou de déroulement. De plus, il n'y a pas à tenir compte du moment provenant des frottements latéraux des pivots du balancier dans $\Sigma k\varphi(\omega)$; et eu égard à la supposition que les autres parties de ce terme sont négligeables, il disparaît complétement. — Introduisons maintenant la *troisième* condition du n° 11, ce qui consiste à s'arranger de façon qu'on ait :

Couple général d'enroulement ou de déroulement $= K\omega$.

Voyons comment il y a moyen de réaliser ce résultat. D'après les définitions données plus haut de θ et de θ_1, l'angle de contingence en un point quelconque du spiral, a $(d\theta_1 - d\theta)$ pour expression de sa variation relative à un angle d'écart ω du balancier. Mais cette quantité $(d\theta_1 - d\theta)$ représente évidemment aussi l'angle dont chaque tranche du spiral tourne autour de sa fibre invariable. Conséquemment, en tenant d'ailleurs compte de ce que le spiral a une longueur L, on trouvera que, d'après les explications ci-dessus, chaque couple élémentaire composant a manifestement pour expression générale : $\frac{E}{L} \times (d\theta_1 - d\theta)$. Dès lors, il viendra :

$$\textit{Couple général d'enroulement ou de déroulement} = \frac{E}{L} \times \left(\int_{s=0}^{s=L} d\theta_1 - \int_{s=0}^{s=L} d\theta \right).$$

Or chacune de ces intégrales forme la somme des angles de contingence du spiral, d'une part, pour un angle d'écart ω du balancier, et, d'autre part, pour la position d'équilibre. En second lieu, remarquons que la longueur du spiral demeure constante. Notons aussi, point sur lequel on ne saurait trop insister, que les angles d'encastrement des deux extrémités du spiral, par rapport aux pièces auxquelles elles se relient, ne varient nécessairement pas. — Dès lors, on conclura que la différence des deux sommes d'angles est égale à l'angle décrit par le rayon oc, *fig.* 13, qui appartient à la virole du balancier, et par suite est égale à l'angle d'écart ω de celui-ci. Nous obtiendrons donc définitivement :

$$\textit{Couple général d'enroulement ou de déroulement} = \frac{E}{L} \times \omega,$$

équation qui cadre bien avec le résultat sus-mentionné qu'il s'agissait de réaliser.

— La relation trouvée entraîne implicitement les conditions de la forme du spiral. En effet, l'expression précitée de chaque couple élémentaire peut s'écrire :

$$\frac{E}{L} \times \left(\frac{d\theta_1}{ds} - \frac{d\theta}{ds} \right) \times ds = \frac{E}{L} \times \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho} \right) ds,$$

eu égard à l'expression bien connue de tout rayon de courbure $\rho = \frac{d\theta}{ds}$.

D'où l'on tire que le couple général a aussi pour expression :

$$\frac{E}{L} \times \int_{s=0}^{s=L} \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho} \right) ds.$$

Il vient donc comme équation de condition de la forme du spiral :

$$\int_{s=0}^{s=L} \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho} \right) ds = \omega.$$

Avec des spiraux suffisamment longs, on peut s'imposer la condition que les parties primitivement héliçoïdales de la fibre moyenne demeurent sans cesse sur un même cylindre de rayon variable. En d'autres termes, pour ces parties on peut poser $\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho} \right) =$ *constante*. Dès lors, il en sera de même ici de la portion de l'intégrale ci-dessus qui s'y rapporte. Donc le reste de cette intégrale, soit la portion qui est afférente aux deux courbes terminales, devra,

de son côté, rester constante, ce qui peut s'obtenir en prenant pour chacune de ces portions *la différence* $\left(\frac{1}{\rho'_1} - \frac{1}{\rho'}\right)$ pareillement constante, et égale à $\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho}\right)$. Or, en remarquant que, par suite des *constantes* en question, on peut ne laisser que ds sous le signe intégrale, et que $\int_{s=0}^{s=E} ds = L$, on parvient à la double équation :

$$\left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho}\right) = \left(\frac{1}{\rho'_1} - \frac{1}{\rho'}\right) = \frac{\omega}{L}.$$

C'est de ces équations que l'on déduit les propriétés énoncées au n° 11, dont doivent jouir les courbes terminales. Mais ces déductions demandent des développements analytiques trop longs et trop délicats pour être donnés dans cet ouvrage.

— En tout état de cause, on tire évidemment de ce qui précède $K = \frac{E}{L}$; et par suite, pour les spiraux à courbes terminales, l'équation (II) du n° 10 donne pour la durée des oscillations simples :

$$T = \pi \sqrt{\frac{IL}{E}}. \qquad \text{(II } bis\text{)}$$

N° 12. Théorie des spiraux isochrones sans courbes terminales : disposition de Berthoud. — M. Caspari a repris sous un point de vue entièrement général la question de l'isochronisme des chronomètres, et a cherché à l'établir indépendamment de toute courbe terminale pour les deux extrémités du spiral. Il s'est reporté, à cet effet, à la règle expérimentale bien connue de Pierre Leroy, et qui peut se formuler ainsi :

« Il y a dans tout spiral d'une étendue suffisante (10 à 12 tours) « une *certaine* longueur, où toutes les vibrations, grandes et petites, « sont isochrones. Au-dessous de cette longueur, les grandes vibra- « tions sont plus rapides que les petites; et au-dessus, c'est le « contraire qui a lieu. »

Cette règle, qui remonte à un siècle, a pendant longtemps servi de guide aux chronométriers, qui obtenaient alors par tâtonnements la longueur *cherchée* à donner dans chaque cas au spiral. Ce n'est qu'à mesure qu'un isochronisme plus parfait a été exigé, qu'on s'est aperçu de la défectuosité de la règle de Leroy, et qu'on a été conduit à se servir des courbes terminales, qui soustraient à l'obligation de donner à la longueur du spiral une valeur *déterminée.*

M. Caspari a pensé que la règle en question ne se trouvait en défaut que parce qu'elle n'était pas suffisamment précise. Il a été confirmé dans son opinion par l'usage, conservé dans l'atelier des Berthoud, d'avoir recours exclusivement à la longueur du spiral, et aucunement à des courbes terminales, pour obtenir l'isochronisme. La règle employée n'est en définitive qu'une explicitation de celle de Pierre Leroy, et peut s'énoncer comme voici, en y introduisant les nombres proposés par M. Vissière :

Dans tous les spiraux cylindriques, il y a deux points d'attache correspondant à N *spires entières* + 90° *et à* N *spires* + 270°, *où les vibrations d'inégale étendue sont isochrones. Entre ces deux longueurs, les grandes vibrations sont plus rapides que les petites ; et en dehors, c'est le contraire qui a lieu.*

Pour justifier théoriquement cette règle, M. Caspari a introduit dans le terme KF(ω) de l'équation (I) du n° 10, le moment des actions *élastiques radiales* du spiral, lesquelles ne s'entre-détruisent plus ici par suite de l'absence des courbes terminales. L'expression de ce moment ne se présente pas, il est vrai, sous forme finie; mais on peut le développer en série, eu égard à la petitesse desdites pressions. Les choses ainsi comprises, l'équation s'intègre facilement, et conduit à la règle sus-mentionnée. De son côté, la durée constante des oscillations conserve présentement la même expression (II *bis*) que celle du n° 12 concernant les spiraux à courbes terminales.

Il importe de remarquer que, parmi toutes les forces susceptibles d'agir sur le balancier, M. Caspari a démontré que les frottements latéraux engendrés par les actions élastiques radiales n'altèrent pas l'isochronisme des oscillations. Il a en outre admis, de même que nous l'avons fait au n° 11, qu'on pouvait toujours s'arranger de façon à faire annuler entre eux les moments des deux forces extérieures appliquées aux deux extrémités du spiral. Enfin, il a omis aussi de tenir compte du moment d'inertie du spiral, ainsi que des autres actions secondaires que M. Phillips a laissées de côté (n° 11) dans sa recherche des courbes terminales. Ce mode d'opérer est justifié dans ce nouveau cas, comme dans le premier, par les résultats du mémoire (n° 8) de M. Villarceau, toutefois encore dans les limites expresses où quelques-uns de ces résultats ne cessent pas d'être applicables (n° 15).

— En résumé, les points caractéristiques sus-spécifiés divisent la spire en deux régions jouissant de propriétés opposées; c'est-à-dire qu'en pinçant le spiral en différents points d'une des régions, les

petits arcs sont accélérés; tandis qu'ils sont retardés pour l'autre demi-circonférence. D'après M. A. L. Berthoud, dans les formes usuelles des spiraux, le maximum de retard ou d'avance peut aller jusqu'à 80 secondes par jour. — Cette propriété fait comprendre facilement comment il y a moyen d'arriver, par voie de tâtonnement, à l'isochronisme dans les limites exactes qu'on se propose d'atteindre. De l'avis de quelques artistes, on y parviendrait plus facilement et plus sûrement par cette voie que par toute autre.

Selon M. Caspari, les fabricants qui rejettent cette manière de procéder craignent les effets d'usure provenant des pressions latérales. De plus, une sorte de sentiment instinctif d'élégance est choquée chez eux par les déformations, en apparence irrégulières, qu'éprouve le genre de spiraux dont il s'agit. M. A. L. Berthoud, qui s'en sert avec succès, n'a pourtant pas remarqué qu'il y ait plus souvent à remplacer des pièces frottantes dans ses montres que dans celles d'artistes qui adoptent des courbes terminales, pourvu que l'huile ne manque pas, ce qui constitue une condition générale et essentielle. Il faudrait en conclure que ces frottements sont de peu d'importance pour la conservation ou l'usure des pièces. Toutefois, on doit remarquer que les chronomètres Berthoud ont des balanciers très-légers, exécutant des vibrations d'amplitude modérée. — Il importe de noter qu'avec ces combinaisons, si les chances de détérioration sont moindres, on n'est pas aussi assuré de la parfaite régularité des marches sous l'influence des dérangements auxquels les montres sont exposées.

N° 14. Spiraux isochrones sans courbes terminales; dispositions diverses. — La marine possède des chronomètres de M. Winnerl, qui marchent sans usure sensible depuis trente ans et plus, et dans lesquels pourtant le spiral ne possède pas de courbes terminales théoriques. Mais ce constructeur s'arrange toujours de façon à obtenir un spiral qui conserve, en se développant, la forme d'un cylindre droit, avec ses génératrices restant constamment parallèles à l'axe. Les pressions latérales, dans ce cas, sont régularisées et non supprimées; de plus l'axe a un mouvement de translation sans balancement. M. Winnerl, qui jouit d'une autorité technique bien justifiée par ses succès, admet que cette excentration est la condition nécessaire de l'isochronisme pratique. — Laissant de côté le fond de ses explications, nous nous bornerons à remarquer que ladite excentration n'augmente pas indéfiniment avec l'amplitude extrême dans les spiraux des bons chronomètres; elle semble avoir un maximum dans le voisinage des

amplitudes limites pour lesquelles la pièce est réglée. M. Caspari n'a pu réussir à faire rentrer ces spiraux dans sa théorie du numéro précédent. Mais on peut concevoir, d'après les principes qui découlent de cette théorie pour le fonctionnement des spiraux sans courbes terminales, comment certaines formes de spiral réussissent. — Quant à présent, la théorie est impuissante à guider la pratique pour ces formes particulières; et l'expérience seule peut prononcer. M. Winnerl réalise presque sûrement l'isochronisme dans les limites voulues. M. Vissière aussi y est arrivé dans un grand nombre de chronomètres que la marine possède.

Enfin A. Bréguet a employé parfois deux spiraux opposés. Il cherchait par ce moyen à régulariser, sinon à supprimer les frottements latéraux des pivots. Cette expérience, refaite par M. Berthoud, n'a pas toujours donné de bons résultats; et l'innovation du célèbre horloger n'a pas acquis droit de cité dans l'art chronométrique.

N° 15. Justification des hypothèses sur les valeurs négligeables de certaines forces dans la théorie des spiraux isochrones. — Les théories de MM. Phillips et Caspari négligent, avons-nous vu aux nos 11 et 13, diverses forces actionnant l'ensemble du régulateur. M. Villarceau, dans son mémoire cité au n° 8, est venu combler cette lacune, en étudiant l'influence sur l'isochronisme desdites forces négligées. Il a introduit à cet effet des valeurs convenables dans le terme $\Sigma k f(\omega)$ de l'équation (I) du n° 10, et s'est livré à une discussion approfondie des résultats analytiques auxquels conduisent ces diverses introductions. Il a laissé de côté le frottement des pivots du balancier, susceptible de provenir d'une pression latérale produite par le spiral. Car cette pression se trouve justement annulée par les courbes terminales de M. Phillips; et avec les autres spiraux isochrones, l'expérience constate qu'elle est insensible. Mais, en revanche, il a considéré le frottement au contact du plan horizontal sur lequel s'appuie le pivot inférieur du balancier, ainsi que l'action provenant de l'imparfaite fluidité des huiles qui lubrifient les pivots et de la résistance de l'air au mouvement du régulateur. Il a prouvé que ces diverses circonstances n'altèrent pas la durée des oscillations, tout en pouvant, bien entendu, affecter leur amplitude. Ces résultats, en ce qui concerne la résistance de l'air, ont du reste été confirmés par les expériences faites en Danemark, et renouvelées récemment à l'observatoire de Kiel.

M. Villarceau a étudié ensuite l'étendue des effets produits sur

l'isochronisme par les impulsions de la roue d'échappement sur la *levée* du balancier, *combinées* avec les causes précédentes. Il a établi que l'altération de la durée de l'oscillation est encore négligeable, sous la *condition expresse* que le balancier reçoive son impulsion dans une position très-voisine de sa position d'équilibre. — Quand il n'en est pas ainsi, et que l'échappement est disposé de façon à produire le choc à une certaine distance *avant* (ou après) le passage du balancier par sa position d'équilibre, il en résulte une *accélération* (ou un ralentissement) de la marche avec la diminution de l'amplitude des oscillations.

Quant aux chocs du *doigt* du balancier contre la détente pour la soulever, leur influence n'a pas été étudiée. Mais comme ces chocs sont incomparablement plus faibles que les impulsions ci-dessus, leurs effets doivent certainement être tout à fait négligeables.

N° 16. Imperfections de l'isochronisme; moyens d'y remédier. — Les travaux de M. Phillips ont fait époque dans la chronométrie; car ils sont venus prouver théoriquement les règles auxquelles l'expérience avait conduit beaucoup d'artistes, depuis Pierre Leroy, et en dehors de la pratique de celui-ci, pour améliorer l'*isochronisme*. Toutefois, l'opinion des horlogers sur les spiraux à *courbes terminales* n'est pas entièrement unanime. Les uns appliquent ces courbes telles quelles; d'autres les modifient légèrement; d'autres encore les rejettent comme ne donnant pas un isochronisme assez parfait. Il y en a enfin qui ont conservé le spiral exactement cylindrique, mais réglé comme longueur suivant les indications du n° 13.

Il est certain pourtant que la théorie des spiraux que nous venons d'esquisser dans les numéros précédents, se trouve établie sur des bases mathématiques. Faut-il donc croire que c'est faute d'habileté qu'un grand nombre d'artistes ne parviennent qu'à un isochronisme insuffisant; ou faut-il en chercher la raison dans des circonstances dont la théorie n'a pas tenu compte, soit dans des lacunes de cette théorie?

M. Caspari s'est proposé de résoudre ce problème, c'est-à dire de rechercher les lacunes susceptibles d'affecter les démonstrations indiquées ci-dessus. — Il a d'abord remarqué que *l'effet de l'échappement* combiné avec les résistances des pivots et de l'air, et supposé négligeable aux n°s 11 et 13, ne l'était pas en principe; car, comme nous venons de le dire au n° 15, d'après M. Villarceau, il n'en est ainsi qu'en faisant produire le choc de l'échap-

pement dans la position d'équilibre du balancier. — Viennent ensuite les perturbations dues aux déformations du balancier sous l'influence de *l'action centrifuge* développée pendant les oscillations. Toutefois, cet effet a été calculé par M. Phillips; et il peut être réduit par le choix d'une forme et de dimensions convenables pour le balancier. — Les deux circonstances précédentes sont une cause *d'accélération* des petites amplitudes. M. Caspari a découvert par l'analyse une troisième cause d'accélération de ces mêmes amplitudes : elle est due au moment d'inertie du spiral, négligé dans la formule générale (I) du n° 10. Il a trouvé que la masse d'un spiral, supposé théorique, exerce sur les oscillations un effet d'avance d'autant plus grand que les amplitudes sont plus petites; du reste cette accélération des petites oscillations est proportionnelle *directement* au carré de l'amplitude et à la quatrième puissance du rayon du spiral, et *inversement* au carré du nombre de spires. — Il importe donc, en principe, de diminuer, autant que cela se peut, le rayon du spiral. On arrive ainsi aux mêmes conclusions que F. Berthoud, qui énonçait il y a un siècle ce fait d'expérience : pour qu'un spiral soit isochrone, il faut qu'il soit fort long, et plié en un grand nombre de tours serrés et de petit diamètre. Cela explique aussi une remarque de M. Jacob, qui trouvait l'isochronisme plus facile à réaliser dans les compteurs, qui ont de petits spiraux, que dans les chronomètres, auxquels on en adapte de plus larges et d'un moindre nombre de spires.

De leur côté, les variations de température, en dehors de leur action plus ou moins compensée (n° 18) sur le balancier, viennent affecter les théories précédentes, en changeant la forme du spiral, et surtout en modifiant suivant une certaine loi son moment d'élasticité, comme nous en avons prévenu au n° 12. —. M. Phillips a trouvé moyen, avec ses courbes terminales, de soustraire le ressort à l'effet de la modification de forme, par la combinaison indiquée au n° 18. D'autre part, c'est par la *compensation*, dont il est traité dans ce même numéro, qu'on cherche à faire disparaître l'effet *important* de la diminution de la force élastique du spiral avec la chaleur. — Il y aurait encore à la rigueur à faire entrer en ligne de compte l'influence desdites variations sur le moment d'inertie du spiral, et par suite sur l'action de ce moment. Mais cette influence est tout à fait négligeable.

— En résumé, diverses causes concourent à affecter l'isochronisme

du spiral, ou du moins à le rendre plus difficilement réalisable. Avec le système de construction ordinairement en usage, où le choc de la roue d'échappement contre le balancier se produit en avant de la position d'équilibre de cette pièce, il y a généralement *accélération* du mouvement du chronomètre, à mesure que l'amplitude des oscillations va en diminuant. Or la diminution d'amplitude est le principal résultat de l'épaississement des huiles; car, d'après ce qui a déjà été dit en 7° au commencement du n° 10, d'une part, le rouage absorbant alors plus de force, il y a diminution de l'énergie impulsive de l'échappement sur le balancier; et, de son côté, ce dernier devient plus résistant au mouvement, de telle sorte que les amplitudes d'oscillation tombent en moyenne de 450° à 330° dans l'espace de trois ans. On comprend dès lors comment la grande majorité des montres marines prennent de l'avance en vieillissant.

Pour quelques chronomètres, surtout parmi les anciens, on observe parfois l'inverse. Quand cette circonstance n'est pas l'effet d'une avarie grave, elle provient d'habitude de ce que les artistes ont cherché, en travaillant le spiral, à obtenir par tâtonnements l'isochronisme rigoureux, en voulant sur-ajouter au bon effet des courbes terminales, et que, dépassant le but, ils sont arrivés à avoir un ressort donnant du *retard* pour les petites amplitudes. Mais alors les difficultés de la compensation augmentent dans une forte mesure, puisque c'est de l'accélération avec les petits arcs qu'il faut (n° 17) pour aider à parfaire sa réalisation. Aussi, est-ce contre leur gré que les artistes en viennent à une pareille combinaison.

Au reste, en fait, les spiraux à *courbes terminales*, dont le fonctionnement est par ailleurs si satisfaisant, donnent d'ordinaire, en l'état actuel des choses, plus ou moins *d'accélération* aux petits arcs. Ce résultat est généralement admis par les horlogers. On peut même croire que c'est à cette propriété que les courbes théoriques ont dû leur succès auprès de divers constructeurs, eu égard, répétons-le, à ce que *l'accélération* des petits arcs est favorable à la compensation. D'autant que le spiral libre et sans frottements autres que ceux de l'axe du balancier au contact du plan horizontal, comme il est réalisé par l'usage des courbes de M. Phillips, se prête mieux que tout autre à l'obtention de telle accélération que l'on veut, attendu qu'il élimine les perturbations résultant des pressions latérales et du frottement sur les parois du trou.

L'étude des chronomètres de notre marine prouve que la produc-

tion *préméditée* d'accélération aux petits arcs est la pratique de plusieurs artistes. C'est là une chose fâcheuse; et l'on est en droit de penser que la perfection de marche au point de vue de la variation de l'amplitude, qu'offrent parfois de tels chronomètres, s'achète au prix d'inconvénients très-réels, comme nous allons le montrer dans le numéro suivant.

N° 17. Principe des spiraux anisochrones. — Nous venons de dire à l'instant que plusieurs constructeurs emploient, de propos délibéré, des spiraux manquant d'isochronisme ou *anisochrones*, et donnant de l'accélération avec les petites amplitudes. Voici, d'après M. Caspari, le motif qui a fait adopter cette pratique.

Soit seulement que la température en s'abaissant diminue la fluidité des huiles, soit que le froid introduise encore d'autres résistances, l'expérience montre que, bien que la force motrice du spiral reste la même, l'amplitude des oscillations décroît avec la température. Nous verrons d'autre part, au n° 20, qu'un balancier *réglé* de telle manière que les marches à 15° et à 30° soient égales, donne du retard à 0°; et que, dans les cas les plus favorables, ce retard n'est guère inférieur à 4 secondes par jour. — Si donc le spiral est disposé de telle manière que les petits arcs correspondant à la température 0° soient plus rapidement parcourus que les arcs plus étendus qui correspondent aux températures de 20° et 30°, on conçoit comment cet anisochronisme arrive à annihiler le défaut de compensation du balancier. — D'excellents artistes condamnent cette pratique; M. Winnerl rejette les spiraux qui donnent une accélération supérieure à 2 secondes par jour. M. Jacob s'élève avec force contre les spiraux anisochrones : « Sans l'isochronisme, dit-il, il n'est pas de véritable chronomètre. »

En somme, si le procédé dont il s'agit venait à dominer dans la pratique courante, il entraînerait infailliblement les plus fâcheuses conséquences. Et en effet, le défaut d'isochronisme pourrait fort bien ne pas se manifester pendant quelque temps, une année même, dans un chronomètre où la force impulsive de l'échappement resterait assez constante pendant ladite durée, pour n'apporter aucun changement à l'amplitude des arcs du balancier dans les températures moyennes. Mais, à la longue, ce défaut donnerait lieu à des variations notables, alors que les causes diverses, produites par le temps, qui concourent à diminuer cette amplitude, s'ajouteraient aux autres circonstances étrangères à l'isochronisme dont le résultat général est

d'accélérer la marche. C'est pourquoi des chronomètres ainsi réglés ne seraient en réalité que des instruments assez médiocres, et procurant une sécurité trompeuse.

M. Vissière aussi, après avoir expérimenté toutes les méthodes proposées, a fini par s'arrêter à l'isochronisme aussi parfait qu'il est possible de le réaliser.

A l'appui des opinions précédentes, nous citerons des chronomètres à spiral anisochrone huilés récemment, revenus au Dépôt de la marine sans avaries graves, pouvant encore marcher, mais dont un peu d'usure des pivots et des trous avait diminué les amplitudes au delà des limites prévues par le constructeur. Or ces instruments présentaient des marches *en avance* de 25 à 30 secondes sur leurs valeurs primitives.

N° 18. Objet de la compensation et du réglage dans les chronomètres. — Considérant que jusqu'ici nous avons implicitement regardé la *température comme constante*, nous déduirons de tout ce qui précède l'importante conclusion que voici :

Pour une même température, l'isochronisme d'un chronomètre est presque parfait et indépendant de l'âge des huiles, sous les deux conditions suivantes :

1° Employer un spiral cylindrique avec courbes terminales (n° 11), ou sinon proportionné comme longueur conformément à la règle rectifiée de Leroy (n° 13) ;

2° Suivre les indications du n° 16 pour remédier aux lacunes secondaires de la théorie des spiraux isochrones; et en particulier faire en sorte que la roue d'échappement choque le balancier dans une position aussi voisine que possible de la position d'équilibre.

Pour achever d'assurer l'isochronisme d'un chronomètre, il reste à rendre la durée de ces oscillations *indépendante des variations de la température.* Or tout changement de température peut avoir les effets suivants : 1° modifier les dimensions du balancier et par suite son moment d'inertie ; 2° altérer la forme, l'élasticité et même le moment d'inertie du spiral, et conséquemment (n° 16) ses qualités propres d'isochronisme; 3° affecter la fluidité des huiles lubrifiant les divers pivots.

Ce changement est aussi de nature à influencer la condition ci-dessus relative à l'instant du choc du balancier par la roue d'échappement, en ce sens qu'en la supposant réalisée pour une certaine température, rien ne dit qu'elle subsistera avec une autre tempéra-

ture. Car le système formé par le balancier, le spiral et le *tenon* (n° 6) qui sert de point d'attache à l'extrémité du spiral opposé au balancier, comprend plusieurs métaux différents ; et dès lors, la figure du spiral ne restant pas semblable à sa figure primitive, la position d'équilibre du balancier variera avec la température. Toutefois M. Villarceau propose de remédier à cet effet par une disposition convenable du point d'attache, consistant à fixer le *tenon* perpendiculairement à une douille cylindrique creuse de même métal, dont l'axe coïnciderait avec celui du balancier, et dont le rayon éprouverait la même dilatation que celui des spires du spiral.

En supposant la condition précédente remplie, ou, sinon, négligeable, il y a à se préoccuper d'annihiler l'influence de la température sur le moment d'inertie du balancier et sur les propriétés du spiral. C'est en cela que consiste le problème de la *compensation*. — Pour bien nous rendre compte des nouveaux phénomènes dont il s'agit, suivons les explications données par M. Caspari dans son mémoire mentionné au n° 8 « *Sur le mécanisme et la marche des chronomètres* ».

Reportons-nous à la formule (II *bis*) du n° 12 qui donne la durée des oscillations :

$$\text{(II } bis\text{)} \qquad T = \pi \sqrt{\frac{IL}{E}}.$$

En admettant que la température croisse, que va devenir cette durée ? D'après ce qui a été dit au n° 12, le spiral aura son moment d'élasticité E qui diminuera ; en même temps, sa longueur L croîtra ; ces deux causes feront donc augmenter T. — De son côté, le balancier, supposé *homogène*, c'est-à-dire composé de pièces de même métal, aura son rayon l qui croîtra, lui aussi ; et, la masse restant invariable, le moment d'inertie I sera augmenté. Il y aura donc encore de ce chef accroissement de T. Dans un pareil chronomètre, tout concourrait pour produire un retard, puisque la durée des oscillations deviendrait plus grande. Dans les montres de poche, on obvie à cet inconvénient en allongeant ou en raccourcissant le spiral à l'aide de la raquette, ce qui permet de faire varier L dans le sens convenable, de façon à conserver au radical de T une valeur constante. Ce procédé serait impraticable dans les chronomètres, parce qu'en raison de l'extrême précision requise, il faudrait effectuer ce réglage toutes les fois que la température varierait. Quant au moment d'élasticité E, on

ne peut songer à y rien changer. Il ne reste donc que le moment d'inertie du balancier sur lequel il y a possibilité d'agir pour combattre le ralentissement dû à la chaleur. De là est venue l'idée de construire le balancier *compensateur.*

Afin d'apprécier l'importance de l'effet des variations de température, on a fait des expériences avec des chronomètres non compensés, c'est-à-dire dont le balancier était homogène. M. Dent, habile horloger anglais, a trouvé avec un balancier de verre :

	marche
à 0°....	$+137^s,8$,
à $+19°$....	$-43^s,2$,
à $+38°$....	$-247^s,2$,

soit environ 10 secondes de retard pour chaque degré d'augmentation de la température. Les variations de la marche sont ici sensiblement proportionnelles à celles du thermomètre. M. Airy a trouvé $10^s,5$ environ de retard par degré centigrade. — Enfin, MM. les ingénieurs hydrographes Delamarche et Ch. Ploix ont opéré avec un chronomètre dont le balancier était en laiton. Leur conclusion est que cet instrument représentait un véritable thermomètre retardant régulièrement de 11 *secondes* par chaque degré d'augmentation de la température. Cet effet est d'ailleurs si bien constaté qu'en Angleterre on s'est servi d'un pareil instrument pour mesurer la température moyenne d'une armoire de chronomètres, avec une précision qu'un thermomètre ordinaire permettait difficilement d'atteindre.

— Pour évaluer la part qui revient dans les résultats précédents au balancier et au spiral, reportons-nous encore à la formule (II *bis*) sus-rappelée, qui donne la durée des oscillations.

Si L et E ne variaient pas, T ne dépendrait que des variations de I. Or le moment d'inertie d'un corps homogène est de la forme ml^2, m étant la masse qui reste la même, et l une longueur soumise à la dilatation. La durée T est donc proportionnelle à l. Le coefficient de dilatation linéaire du laiton est 0,000018 ; une longueur l à la température $\theta°$, deviendra à très-peu près $l(1+0,000018)$ à la température $(\theta+1)°$. Donc la durée de l'oscillation à $\theta°$ multipliée par $(1+0,000018)$ donnera la durée de l'oscillation à la température $(\theta+1)°$. Si, par exemple, à $\theta°$ le chronomètre bat exactement la 1/2 *seconde de temps moyen*, l'intervalle des battements à $(\theta+1)°$ sera $1/2(1+0,000018)$; et la durée

totale des vingt-quatre heures marquées par ce chronomètre, sera égale au nombre précédent multiplié par 86400^s, soit à 86401^s,56, excédant de 1^s,56 celle du jour moyen. Par l'effet du balancier seul, et en faisant abstraction du spiral, le chronomètre retardera donc de 1^s,56 par jour chronométrique, pour chaque degré d'augmentation de température.

Nous pouvons calculer de la même manière l'effet de l'allongement du spiral. Le coefficient de dilatation de l'acier est 0,000012; et comme T est proportionnel à $\sqrt{L}$, 1 degré d'augmentation de la température le fera proportionnel à $\sqrt{L(1,000012)}$ ou à $1,000006\sqrt{L}$. On trouvera de ce chef 0^s,52 de retard diurne. Ajoutons ce retard 0^s,52, avec le précédent 1^s,56; nous aurons 2^s,08 pour le retard résultant dû à l'influence de la dilatation sur le balancier et sur le spiral, en admettant d'ailleurs que l'évaluation des effets de chaque facteur indépendamment de l'autre soit licite, ce qui se justifie analytiquement par cette considération que, les coefficients de dilatation étant des quantités très-petites, la variation d'un des facteurs influe peu sur celle de l'autre.

Retranchant le retard résultant 2^s,08, des 11 secondes mentionnées ci-dessus, comme fournies par l'expérience pour le retard *total* dû à l'action de la chaleur, on trouve que la *diminution de la force du spiral* afférente au changement de valeur précité de son moment d'élasticité, produit à elle seule 9 secondes de retard diurne pour chaque degré d'augmentation de la température. C'est donc là la cause la plus importante de la variation des marches à la chaleur.

La compensation exige donc non-seulement que le rayon du balancier n'augmente pas par la chaleur, mais que son moment d'inertie *diminue* à mesure que la température *croît*. Le balancier, en d'autres termes, doit se contracter à la chaleur; et, bien entendu, se dilater au froid. C'est cette considération qui a suggéré l'emploi des lames bi-métalliques.

— Le problème de la compensation a été résolu depuis bien longtemps; mais il a été repris à de nouveaux points de vue par M. Villarceau dans son mémoire cité au n° 8. De son côté, M. Phillips a trouvé, comme nous l'avons annoncé au n° 16, que les spiraux à courbes terminales pouvaient être soustraits à l'influence des variations de forme dues aux changements de température. Il suffit pour cela que lesdites courbes aboutissent au centre des spires, ou, sinon,

que la connexion du spiral avec l'axe du balancier ait lieu à l'aide de métal de même espèce que celui du spiral.

Abstraction faite de l'influence des variations de température sur la forme du spiral, l'essentiel est de s'occuper de l'action de ces variations sur les autres éléments du spiral, et sur tout le système du balancier lui-même, dont il importe d'avoir bien présente à l'esprit la description donnée au n° 5.

Lorsque la température croît, les moments d'inertie des lames, de la barrette et des masses régulatrices augmentent, en même temps que le *moment* de la force élastique du spiral diminue. Il faut donc que les moments d'inertie des masses *compensatrices* puissent décroître de manière à contre-balancer l'effet des autres changements. C'est pour cela que ces dernières masses ont été placées sur des lames bi-métalliques; le métal extérieur étant plus dilatable que le métal intérieur, les lames se courbent davantage et les masses compensatrices se rapprochent du centre. Ce degré de rapprochement varie avec la position des masses le long des lames; au moyen des vis qui y sont adaptées, on les arrête dans la position jugée la plus favorable.

On doit comprendre que le problème de la compensation ne consiste pas seulement à fixer la place qu'il convient d'assigner aux masses *compensatrices*, mais qu'il s'agit aussi de déterminer la grandeur et le moment d'inertie de ces masses elles-mêmes, eu égard à la distribution de la matière dans les autres parties dont se compose le balancier et à la constitution des lames bi-métalliques. En tout état de cause, on parfait la compensation à l'aide des masses *régulatrices*. Il faut d'ailleurs se préoccuper de préciser, du même coup, l'influence des quantités précédentes sur la *grandeur absolue* de la vitesse du chronomètre, et par suite sur la valeur *intégrale* de sa marche. On en conclut alors la manière de procéder au *réglage proprement dit*, c'est-à-dire la manière d'amener ladite vitesse à être comprise entre des limites données, telles que le chronomètre batte à peu de chose près 86.400 secondes par jour moyen, ce à quoi on parvient (n° 20) en s'aidant particulièrement des masses *régulatrices*, et de leurs vis supplémentaires.

— On ne s'imagine pas aisément l'extrême délicatesse d'action des organes dont il vient d'être question. Ainsi un changement d'une seconde par vingt-quatre heures dans la marche d'un chronomètre est déjà une quantité très-notable dans l'espèce. Or, il y a 86.400 se-

condes par jour; conséquemment il suffit, pour produire ce changement, que chaque oscillation soit diminuée ou augmentée de 1/86400 de sa valeur; et cela s'obtient par un déplacement des masses compensatrices de 1/86400 de leur distance au centre. Dès lors, si cette distance est, comme dans les chronomètres de M. Winnerl, de 27 millimètres, le déplacement sera à peu près de 3 millièmes de millimètre. Pour apercevoir cette quantité, il faudrait un microscope grossissant plus de mille fois *en surface.*

Aussi n'est-ce pas par des mesures directes de longueur ou de poids que les artistes arrivent à régler les montres. C'est en établissant d'abord leur régime d'une manière approximative; puis en observant les variations de leur marche, et les corrigeant par des tâtonnements très-longs et très-minutieux.

N° 19. Théorie de la compensation et du réglage des chronomètres. Erreur secondaire. — M. Villarceau s'est livré dans son mémoire à tous les calculs que nous venons de signaler.

Considérant l'épaisseur des lames comme une quantité très-petite relativement au rayon du balancier, et négligeant les quantités du second ordre, il établit d'abord le point suivant : l'allongement éprouvé par un filet quelconque de la lame bi-métallique est égal à l'allongement subi par un filet situé à la suface de séparation des deux lames, augmenté ou diminué, suivant qu'il s'agit du laiton ou de l'acier, d'une quantité proportionnelle tant à la distance des filets à la surface de séparation qu'à la variation de courbure de cette surface de séparation. — Calculant ensuite les tensions qui résultent de ces allongements, et remarquant que, pour l'équilibre intérieur du corps, il faut que, dans une section quelconque, la somme de ces tensions soit nulle, il établit les équations qui définissent la courbure de la lame déformée en fonction de sa courbure initiale, de ses dimensions et des coefficients de dilatation et d'élasticité des deux métaux. — Il résulte de ces équations que, si la lame est circulaire à une température déterminée, elle restera circulaire quand la température variera, le rayon seul du cercle variant. — On en déduit aussi que le rapport des épaisseurs des lames, correspondant au maximum de déformation ou de sensibilité, est inverse du rapport des racines carrées des coefficients d'élasticité. Ceci donne, dans le cas de l'acier et du laiton, une épaisseur de 1,2 d'acier contre 1,7 de laiton. (Les artistes adoptent généralement 1 d'acier et 2 de laiton; mais M. Ber-

thoud a reconnu par l'expérience que les proportions les plus favorables sont 2 acier et 3 laiton.)

M. Villarceau fait voir ensuite de quelle façon on peut s'assurer, par expérience directe, qu'un balancier remplit bien les conditions de se déformer suivant la loi posée, c'est-à-dire qu'il est bien exécuté.

— Enfin, après avoir établi les formules qui donnent le moment d'inertie des diverses parties du balancier et leurs variations avec la température, il indique comment, en faisant varier certains de ces éléments, notamment les masses, on peut déduire de l'observation des marches du chronomètre, les valeurs les plus convenables desdits éléments pour obtenir une bonne compensation.

A cet effet : — 1° on mesure les diverses masses *compensatrices* et *régulatrices* et leurs moments d'inertie par rapport à l'axe du balancier, après qu'on les a placées dans deux positions différentes et du reste arbitraires. — 2° On observe la marche du chronomètre à diverses températures, dans les deux distributions différentes en question. — 3° On en déduit les corrections à appliquer aux éléments du balancier pour produire une première compensation à l'aide des masses compensatrices, et un premier *réglage proprement dit.* — 4° On observe ensuite la marche du chronomètre à des températures variées; et on en déduit le déplacement que doivent subir finalement les masses compensatrices et régulatrices.

Malheureusement les règles que nous venons d'esquisser ont semblé jusqu'ici inabordables aux praticiens. Il serait bien à désirer que leur partie essentiellement pratique fût rédigée sous forme d'un manuel, comme l'a fait avec le plus grand succès M. Phillips pour ses spiraux.

— Par ailleurs, les opérations précédentes supposent que l'on soit en droit de négliger les termes dépendant du carré des variations de la température. M. Villarceau a prouvé qu'il pouvait généralement en être ainsi, pourvu qu'on rende les lames *bi-métalliques* plus ou moins sensibles, suivant que l'on trouve une valeur soit positive, soit négative ou nulle pour la dérivée seconde, par rapport à la température, de la quantité $\frac{E}{L}$ de la formule (II *bis*) du n° 12. — Comme c'est la troisième supposition qui se réalise avec les bons spiraux, on doit de ce chef augmenter l'épaisseur desdites lames, ce qui entraîne incidemment l'avantage de restreindre les déformations

du balancier par la force centrifuge, et les inconvénients qui s'ensuivent (n° 16).

— Il importe de remarquer que plus le chronomètre dont on s'occupe est bon et bien réglé, plus il est nécessaire de tenir compte des termes de correction proportionnels au carré de la température, et dont l'influence porte le nom d'*erreur secondaire* en horlogerie.

Les artistes se sont appliqués, avec des fortunes diverses, à détruire l'erreur secondaire par des dispositions particulières. C'est là l'origine du procédé (n° 17) qui consiste à altérer l'isochronisme du spiral; mais de la sorte on corrige un défaut par un autre. Il vaut mieux essayer de modifier le balancier lui-même; tel est le but des compensations additionnelles employées par divers fabricants (n° 21).

M. Villarceau a d'ailleurs montré comment parfois le défaut de compensation des termes du premier degré peut entraîner l'annulation des termes du deuxième, et par suite de l'erreur secondaire.

N° 20. Procédés usuels de réglage des chronomètres. Température de réglage. — A défaut de l'application des principes proposés par M. Villarceau (n° 19) pour la compensation et le réglage proprement dit des chronomètres, double opération que l'on englobe sous le nom unique de *réglage*, les praticiens ont recours aux tâtonnements annoncés au n° 18.

Ces tâtonnements consistent à fixer la position des masses *compensatrices*, de manière que les oscillations du balancier aient la *même durée* pour deux températures très-différentes, τ_1 et τ_2 (d'habitude 0° et 30°, limites correspondant aux températures extrêmes susceptibles d'être subies par les chronomètres dans les navigations habituelles). On ramène ensuite la valeur de la marche dans les bornes voulues (n° 18) à l'aide des masses *régulatrices* et de leurs vis complémentaires. Enfin, on raffine les opérations précédentes en retouchant légèrement aux diverses masses sus-mentionnées.

La possibilité d'égaliser les marches à deux températures données (0° et 30°), provient de la circonstance suivante : afin d'avoir une certaine liberté d'action, on doit avoir des lames bi-métalliques du balancier assez sensibles et déformables, pour que, les masses *compensatrices* étant placées à l'extrémité libre de ces lames, la chaleur ou le froid produise un rapprochement ou un écartement plus considérable que celui qui est nécessaire pour la compensation, en notant

d'ailleurs que ces masses, placées à l'autre extrémité près de la barrette, ne produisent évidemment pas d'effet du tout. Avec la chaleur on aura de l'avance dans la première position, et du retard dans la seconde; et *vice versâ*, avec le froid. Il existe donc un point de la lame pour lequel le chaud ou le froid ne produira ni avance ni retard; et ce point peut se trouver par tâtonnements en déplaçant les masses. — Mais rien ne dit *à priori* que cette égalité obtenue pour deux températures extrêmes s'étendra aux températures intermédiaires. Pour que cela eût lieu, il faudrait, d'après la formule (II *bis*) du nº 12, qu'avec un accroissement donné de la température, le moment d'inertie du balancier variât d'une quantité proportionnelle à la variation de l'action $\frac{E}{L}$ du spiral. — On cherche, dans tous les cas, à obtenir que la marche soit le plus constante possible entre 0° et 30°. Mais, malgré tous les soins apportés, il arrive d'ordinaire que cet élément varie entre les deux températures extrêmes τ_1 et τ_2 pour lesquelles on a réglé les positions des masses compensatrices. L'expérience prouve que la marche est alors *maximum* à $\frac{\tau_1 + \tau_2}{2} = \tau$. Cette température moyenne τ, au-dessus et au-dessous de laquelle la marche va en diminuant, à peu près symétriquement d'ailleurs, s'appelle *température de réglage*. Les horlogers sont arrivés aujourd'hui à pouvoir réduire à 2 secondes le retard aux températures extrêmes; et un chronomètre qui varie en dehors de ces limites, est regardé comme possédant une compensation défectueuse.

Au surplus, M. Villarceau a prouvé par l'analyse qu'on pouvait parvenir à diminuer de plus en plus le défaut de compensation dépendant de la *première puissance* des variations de la température. Mais, en revanche, on ne saurait alors parvenir, avec un spiral isochrone et avec un balancier circulaire sans compensation *additionnelle*, à annuler l'influence de la *seconde puissance* desdites variations, c'est-à-dire l'*erreur secondaire* (nº 19).

— Depuis quelques années, plusieurs fabricants ont réussi à obtenir des marches oscillant entre des limites excessivement restreintes, pour les diverses températures comprises entre les deux températures extrêmes de réglage. Ils emploient à cet effet une série de toutes petites vis incrustées en des points divers des lames bi-métalliques du balancier. Cette opération demande des tâtonnements infinis et une patience infatigable; mais, selon nous, c'est là un raffi-

nement qui peut être bon pour gagner une prime (n° 29), mais qui n'offre aucun avantage pour la navigation. Car, selon l'opinion fort rationnelle de M. Mouchez, il vaut mieux avoir à sa disposition des chronomètres à marche changeant franchement et suivant une loi nette avec la température, et dès lors rectifiables rigoureusement, que des montres à variations indécises. Il va de soi qu'avec la disposition dont nous venons de parler, ce que nous avons appelé plus haut la *température de réglage* n'existe plus.

— Pour les montres où cette température a sa raison d'être, on peut, d'après une étude faite au Dépôt de la marine, sur près de 2.500 de ces montres, formuler la règle suivante :

Avec un spiral isochrone et un balancier circulaire bien exécuté et bien réglé, le chronomètre ayant des marches égales entre elles à 0° et 30°, avancera d'au moins 2 secondes à la température de 15°. Réglé à 0° et 15°, il retardera au moins de 4 secondes à 30°. De même, réglé à 15° et 30°, il retardera de 4 secondes à 0°. — Il importe d'ajouter qu'avec les chronomètres imparfaitement compensés, les indications précédentes relatives à la température de réglage cessent d'exister.

Divers artistes suivent pour le réglage une méthode opposée à la précédente. En d'autres termes, ils règlent les chronomètres bien exactement pour une température moyenne donnée τ (d'ordinaire 15°). Puis, ils les soumettent à des températures extrêmes τ_1 et τ_2 (en géneral 0° et 30°), également éloignées de la température moyenne. Enfin, à l'aide des masses *compensatrices*, ils ramènent les marches correspondant à ces températures à être égales entre elles. Mais la marche va encore ici en diminuant au-dessus et au-dessous de la température τ.

N° 21. Différentes modifications du balancier normal, suscitées par le besoin d'améliorer le réglage. — Généralement on conserve le balancier circulaire, à cause de la facilité d'exécution qu'il présente. On se borne à y ajouter certaines dispositions destinées à modifier la loi d'après laquelle les masses se déplacent, et à corriger ainsi l'*erreur secondaire* (n° 19), sans avoir recours à l'emploi défectueux d'un spiral *anisochrone* (n° 17). Presque chaque constructeur possède un système à lui. Nous nous bornerons à indiquer, d'après M. Caspari, les plus intéressants. Rendons-nous bien compte du résultat cherché; et nous comprendrons facilement les divers dispositifs qui ont été imaginés.

Soit un balancier circulaire, réglé pour la température de 15°. Le chronomètre retardera à 0° et 30°; le moment d'inertie du balancier est donc trop grand dans ces deux cas. Or, quand la température passe de 15° à 0°, l'effet des lames est d'éloigner les masses du centre ; et puisqu'en général il y a retard, c'est que les masses s'éloignent *trop*. Il s'agit donc, dans cet intervalle, de restreindre l'éloignement des masses. Quand la température passe de 15° à 30°, on conclura de même que les masses ne rentrent pas assez ; il faut donc accroître ce rapprochement. Ainsi, diminuer le déplacement habituel des masses aux basses températures, l'exagérer à la chaleur : tel est le but à atteindre.

M. Dent, célèbre chronométrier anglais, a décrit dans une brochure plusieurs systèmes imaginés par lui à cet effet.

Un artiste français, M. Vissière, a obtenu de fort beaux résultats en modifiant une des idées de Dent pour l'appliquer au balancier circulaire. Les lames de celui-ci, au lieu de supporter directement les masses, portent deux anneaux bi-métalliques de petites dimensions, ayant la forme de cercles presque complets, et de plus ayant le laiton en dedans, de façon à s'ouvrir à la chaleur, à l'encontre de ce qui a lieu pour les lames. Chaque anneau a un de ses bouts qui s'attache par un bras sur la lame correspondante ; l'autre bout, situé à l'extérieur de la lame, porte une masse compensatrice. Les choses étant combinées de la sorte, si l'anneau s'ouvre ou se ferme, la masse se rapproche toujours de la lame. — Dès lors, avec une augmentation de température, le point d'attache de chaque anneau se rapproche de l'axe du balancier ; en même temps l'anneau lui-même s'ouvrant, la masse fixée au bout libre a sa distance à la lame, et par suite audit axe qui diminue. On a donc une exagération de rapprochement par la chaleur. — On voit facilement qu'au contraire l'éloignement au froid se trouve réduit ; car chaque anneau, tout en se fermant cette fois, détermine, au moins en ce qui le concerne, et aussi bien qu'il le faisait tout à l'heure par son ouverture, un rapprochement de la masse régulatrice d'avec la lame.

— M. Jacob avait eu recours à une combinaison plus simple et plus facile à réaliser. Elle consiste à ajouter à l'axe du balancier une deuxième barrette mobile autour de cet axe.

Les deux barrettes étant superposées, on règle d'abord le chronomètre aux températures de 15° et 30°. Puis, on fait faire à la barrette mobile un petit angle avec la barrette fixe ; et on l'arrête

dans cette position. Les extrémités de cette barrette servent d'écrou à deux vis que l'on amène à toucher exactement les lames bi-métalliques à la température de 15°. La température baissant, le point de contact est arrêté; et le mouvement de déformation de la lame est borné à la partie comprise entre la vis de pression et l'extrémité libre. C'est donc comme si l'on réduisait sa longueur, c'est-à-dire sa sensibilité; et le mouvement des masses qui s'éloignent de la circonférence se trouve ainsi diminué, conformément au *desideratum* exposé plus haut. — La position de la barrette mobile se règle de manière à égaler les marches à 0° et à 15°.

— M. Th. Leroy s'est beaucoup rapproché du but qui nous occupe par un moyen très-simple.

Il ajoute à son balancier circulaire une lame bi-métallique très-sensible (zinc et platine sous une faible épaisseur totale), placée en croix avec la barrette, et portant à ses extrémités de petites masses en platine. Le balancier circulaire fonctionne librement, comme à l'ordinaire. Quant à la pièce auxiliaire, *plane* à la température moyenne, elle se *courbe* verticalement, et d'ailleurs en sens inverse, aux extrêmes; et par suite, dans ces deux cas, les masses auxiliaires très-denses qu'elle porte, se rapprochent légèrement du centre, et produisent un peu d'avance.

— Nous citerons encore la compensation additionnelle Loseby, bien qu'elle ne soit pas employée par nos horlogers français, parce qu'elle est fondée sur un principe tout différent, et qu'elle n'emploie pas de lames bi-métalliques pour compléter l'effet cherché.

A l'extrémité libre des lames du balancier ordinaire, M. Loseby adapte la boule d'un thermomètre à mercure, dont le tube est recourbé et vient aboutir près du centre. Cette boule fait fonction de masse compensatrice, et suit les mouvements de la lame bi-métallique. Mais, à mesure que la température s'élève, une partie du mercure quitte la circonférence et se porte vers le centre, ce qui fait décroître le moment d'inertie plus rapidement. Cet effet peut être gradué par les proportions des tubes et par leur forme. Toutefois, la construction d'un pareil thermomètre ne saurait être parfaite et expose à bien des mécomptes.

— L'Angleterre nous a envoyé dans ces dernières années un nouveau système de balancier très-différent de tous ceux que nous venons de décrire : c'est le *balancier Hartnup*.

Cet appareil a été conçu et exécuté d'après des vues théoriques

propres à l'auteur. L'expérience a donné en partie raison à cette combinaison. M. Winnerl a importé cette nouveauté en France avec un certain succès, qui a engagé depuis M. Dumas et M. Leroy à en tenter l'application à leur tour avec des chances variables. Le succès ne paraît pas toujours assuré; et les artistes qui ont réussi avec le balancier Hartnup, avaient obtenu et obtiennent encore de fort beaux résultats avec le balancier ordinaire. Mais la marine a acquis un certain nombre de montres qui en sont munies. Il ne sera donc pas sans intérêt d'en donner ici la description. Le balancier Hartnup diffère du balancier circulaire : 1° *par la barrette;* 2° *par la forme des lames et des masses.*

La barrette est remplacée par un système de trois lames planes bi-métalliques situées côte à côte dans un même plan. Celle du milieu est percée d'un trou dans lequel passe l'axe du balancier; et elle porte à chacune de ses extrémités un talon où vient s'attacher l'une des deux autres lames. L'acier étant en dessus dans les trois lames, l'accroissement de la température a pour effet de ramener vers le centre, en les élevant, les extrémités des lames de côté. A ces extrémités s'adaptent deux arcs bi-métalliques circulaires, mais qui, au lieu d'être limités par des surfaces cylindriques, sont compris entre deux surfaces tronconiques, avec les génératrices des cônes inclinées à 45° sur l'axe. Ces arcs portent des masses compensatrices de forme assez irrégulière. Ils fonctionnent comme les arcs ordinaires; mais ils éprouvent simultanément, de la part de leur barrette bi-métallique respective, un mouvement qui les rapproche du centre et en même temps les fait incliner. Le jeu des masses se compose donc, en définitive, de trois mouvements : deux de translation et un d'inclinaison. Il est aisé de concevoir que la température imprime au balancier des déformations considérables, et en apparence peu régulières.

Cette combinaison, bien que réduisant l'*erreur secondaire* (n° 19), la laisse encore subsister dans une certaine mesure; et elle est plus difficile à régler qu'avec le balancier ordinaire.

— Enfin M. Winnerl a imaginé et réalisé un balancier qui paraît être une solution très-heureuse du problème de la compensation. Bien qu'il s'agisse ici d'une idée qui est encore en expérience, et quoique aucun de nos chronomètres naviguant n'en soit pourvu, l'appareil est en lui-même trop ingénieux pour que nous n'en donnions point une idée succincte.

Conserver l'isochronisme le plus rigoureux du spiral, et produire

la compensation à l'aide d'un balancier d'une exécution simple et pouvant se régler en place, c'est-à-dire sans l'enlever du chronomètre, tel est le problème que s'est posé M. Winnerl.

Sur l'axe du balancier, il existe deux barrettes en acier faisant entre elles un angle un peu plus petit que 90°. L'une de ces barrettes porte à ses extrémités deux écrous *réglants* en platine. La seconde barrette se termine à chacun de ses bouts par un talon, sur lequel on fixe une lame bi-métallique plane et droite. Les lames bi-métalliques sont en acier et laiton, l'acier en dessus. A leur extrémité libre, elles portent deux vis en métal inclinées à environ 45° sur l'horizontale. Sur ces vis sont montés deux écrous en platine, qui ont la forme de solides de révolution, et font office de masses *compensatrices.* — A la température de réglage adoptée, soit à 15°, les lames se trouvent planes. La température variant, elles se courbent; la convexité étant dirigée vers le *haut* si la température *baisse* et vers le bas si elle monte; en même temps, les masses compensatrices tournent d'un certain angle égal au changement de courbure des lames. De là déplacement des masses.

M. Caspari a analysé avec une grande dextérité mathématique les effets de la température sur le balancier Winnerl. Il a ainsi établi que : 1° cet appareil se prêtait très-aisément à la correction de l'*erreur secondaire* (n° 19); 2° l'influence de la déformation centrifuge (n° 16) du balancier sur l'isochronisme, qui se traduit d'ordinaire par une *accélération*, est réduite plus qu'avec tout autre balancier, et peut même être changée en un retard. Or, ce point est capital pour corriger la petite accélération en général inhérente (n° 16) aux spiraux à *courbes terminales.*

Si l'expérience vient à ratifier ces prévisions, il n'est aucun doute que le balancier Winnerl ne soit appelé à devenir d'un usage exclusif.

§ II.

VARIATIONS NORMALES DES MARCHES DES CHRONOMÈTRES, ET VARIATIONS ANORMALES OU PERTURBATIONS.

N° 23. Classification des diverses variations des marches des chronomètres. — Les conditions de compensation et de réglage n'ont pas jusqu'ici été réalisées avec toute la perfection voulue. De leur côté, les conditions d'isochronisme rigoureux pour une même

température ne sont pas encore satisfaites complétement. Il suit déjà de là que les marches des chronomètres n'ont pas un degré de constance absolue. Toutefois, les variations qui en résultent ont une certaine régularité, et sont caractérisées par ce fait que, pour une même température et un même âge des huiles, elles reprennent la même valeur.

Mais aux susdites causes d'imperfection viennent s'en ajouter d'autres qui tendent encore à affecter le degré de constance sus-mentionnée, avec cela d'aggravant qu'elles le font sans aucune régularité, et que leur effet n'a aucune corrélation fixe avec elles-mêmes, et peut se modifier ou disparaître soit à la longue, soit même d'un instant à l'autre. — De là découle la nécessité de bien spécifier les *diverses espèces de variations* que les marches des chronomètres sont sujettes à subir.

Nous distinguerons les premières sortes de variations sous le nom de *variations normales;* et les secondes sous celui de *variations anormales* ou *perturbations.*

Les perturbations elles-mêmes doivent être subdivisées :

1° *En perturbations dues au travail des métaux des diverses pièces du régulateur, ou à leur état magnétique;*

2° *En perturbations provenant de l'inclinaison de la suspension du chronomètre;*

3° *En perturbations spéciales à l'état atmosphérique et à la navigation;*

4° *En anomalies extraordinaires et en arrêts.*

Parmi les divers effets dus aux perturbations, il en est qui consistent en *sauts* de l'état absolu n'affectant pas la marche, ce qui revient, du reste, à supposer que celle-ci a subi, dans un certain intervalle de temps, une modification déterminée qui disparaît complétement à l'intervalle suivant. Mais nous n'insisterons pas davantage ici sur la *spécification* desdits effets, qui est donnée *in extenso* et méthodiquement au n° 157 des " *Nouvelles méthodes de navigation.* "

Il va de soi que la *variation totale* d'une marche comprend la superposition d'un plus ou moins grand nombre des diverses sortes de variations précédentes, suivant la simultanéité avec laquelle elles sont en mesure de se produire.

N° 22. Variations normales des marches. Définition du mot accélération en chronométrie. — D'après les considérations des n°s 16, 17 et 20, les *variations normales* des marches

relèvent exclusivement de l'âge des huiles et de la température suivant les lois suivantes :

Dans les chronomètres modernes, la marche tend en général à *s'accélérer* avec le temps à température égale. Selon le D[r] Peters, directeur de l'Observatoire de Kiel, cette accélération (n° 111 des " *Nouvelles méthodes de navigation* ") serait très-forte au début avec les chronomètres neufs des constructeurs de second ordre, et irait en diminuant progressivement. Dans les chronomètres de construction ancienne, c'est parfois du retard qui se produit à mesure que les huiles vieillissent. — Dans les bons chronomètres, les causes des variations normales de la marche dues au temps, augmentent rarement la valeur primitive de celle-ci de plus de 3 ou 4 secondes en un à deux ans.

De son côté, l'influence de la température sur les variations normales de la marche, consiste en un retard à peu près symétrique, tant au-dessus qu'au-dessous de la température de réglage, retard dont nous avons indiqué les proportions habituelles au n° 20, mais qui se modifie d'un chronomètre à un autre. — Toutefois, dans les chronomètres imparfaitement compensés, ladite influence est de nature à s'exercer autrement. La symétrie de marche dont nous venons de parler autour de la température de réglage cesse d'exister. Et même si, en se basant *à priori* sur cette symétrie, on déduisait de l'observation de marches à différentes températures, une soi-disant température de réglage, on trouverait, pour cette quantité, une valeur exagérée, et ne représentant aucunement l'élément qu'on croirait indûment posséder. —Par ailleurs, il y a des chronomètres (n° 20) où, au contraire, la compensation entre les deux températures limites de réglage, est assez parfaite pour qu'il n'y ait plus de température de réglage. En pareil cas, on n'est plus à même de préciser suivant quel sens la chaleur ou le froid influence la marche en dehors desdites limites.

— On doit encore comprendre, parmi les *variations normales* des marches, les changements de celles-ci pouvant provenir à la longue d'une modification régulière : 1° de la force élastique du spiral ; 2° des coefficients de dilatation des métaux de ces deux pièces ; 3° de l'influence de la chaleur sur la fluidité des huiles. — Ces changements ne doivent pas être confondus avec ceux dont nous allons parler au n° 24, dus à des causes analogues à quelques-unes des précédentes, mais avec cette différence capitale que les effets sont cette fois brus-

ques, irréguliers et capricieux, et engendrent dès lors des *variations anormales* ou *perturbations*.

— Il est nécessaire de bien préciser le mot *accélération* en chronométrie.

Quoique la définition *mécanique* de cette expression s'applique aux mouvements retardés aussi bien qu'à ceux dont la vitesse croît, l'emploi général du mot correspond présentement à ce fait d'expérience que, dans la plupart des chronomètres, la variation a lieu dans le sens d'une augmentation de vitesse : les marches en avance vont en augmentant; les retards vont en diminuant, et peuvent devenir des avances.

Bien plus, l'expression dont il s'agit est en général réservée pour caractériser l'action habituelle de l'âge des huiles sur la marche par unité de temps adoptée, ainsi qu'il est spécifié mathématiquement au n° 111 des "*Nouvelles méthodes de navigation.*"

N° 24. Perturbations des marches dues au travail des métaux des diverses pièces du régulateur, ou à leur état magnétique. — Indépendamment de la cause *normale* de la variation des marches par la chaleur ou par le froid, voire même simplement par le temps de service de l'instrument, il est une autre cause irrégulière et beaucoup moins connue. Elle tient à des changements qui s'opèrent dans l'état moléculaire des pièces, et particulièrement dans la structure intime du balancier et du spiral. En un mot, elle tient à ce que le métal, dans diverses pièces, *joue* ou *travaille*. M. Caspari a fait sur ce sujet une étude spéciale, dont nous avons extrait, en grande partie, les développements qui suivent.

D'après une remarque de M. Fizeau, les métaux se trempent à toutes les températures, c'est-à-dire que le changement d'état moléculaire auquel est due la trempe, ne se produit pas seulement quand on passe brusquement d'une température très-élevée à une température basse. Il a lieu, quoique à un degré beaucoup moindre, pour tous les abaissements un peu *brusques* de température. — Or pour faire le spiral on prend un fil rectiligne qu'on contourne en hélice, et qu'on trempe sous cette forme. Mais la trempe ne détruit pas absolument la tendance des molécules à se rapprocher de leur ancien mode de groupement ; les pièces courbes surtout, façonnées à une température inférieure à celle de la trempe, ne possèdent pas une stabilité complète de forme. Ainsi un spiral soumis à des effets thermométriques variant rapidement, change sa force élastique propre à

une température déterminée (n° 12), surtout quand il est *neuf*. On a souvent remarqué aux concours du Dépôt de la marine, que les chronomètres en expérience, au sortir de l'étuve où on les soumet à une chaleur de 30°, au lieu de reprendre à la température ambiante la marche qu'ils avaient avant leur introduction dans l'étuve, présentaient une différence brusque de marche pouvant s'élever à deux secondes par jour, et toujours en *accélération*, ce qui semble bien devoir se rapporter à un effet de trempe du spiral. Quelquefois cette modification s'atténue au bout de peu de jours; souvent elle persiste. — Toutefois, il y a des cas où l'explication que nous donnons peut être insuffisante. Ainsi les comparaisons journalières permettent de constater que l'accélération mentionnée plus haut se produit parfois dès le séjour même du chronomètre dans l'étuve. D'autre part, il n'est pas rare que l'on constate une accélération analogue à la précédente, sauf que cette fois elle est *brusque*, dans les montres *neuves* qui passent rapidement d'un climat froid aux pays tropicaux. En pareil cas, du reste, l'*accélération* masque plus ou moins le retard normal (n° 23) dû aux élévations de la température au delà de la température de réglage. — Des effets inversés aux précédents se remarquent quand les chronomètres passent du chaud au froid; mais ils sont moins tranchés, et toujours plus persistants.

L'explication des derniers phénomènes sus-relatés ne saurait plus être basée sur un effet de trempe; car la température croît d'une façon trop continue. On est amené à penser au balancier. Et effectivement, les métaux fondus acquièrent, lors du refroidissement, un équilibre moléculaire très-instable; la surface se solidifie avant l'intérieur, alors que celui-ci est encore très-dilaté. Il en résulte des tensions moléculaires très-grandes dans l'intérieur de la masse, dont la structure peut dès lors se modifier sensiblement même sous une action modérée de la chaleur. M. Brunner cite l'exemple d'un cercle de théodolite en bronze fondu, dont les rayons ont éclaté avec fracas quand on a commencé à le travailler au tour. Toutefois, il ne faut pas s'exagérer ladite modification de structure. On n'emploie pour les balanciers qu'une surface très-mince des masses métalliques qu'il a fallu fondre; le recuit et le martelage font disparaître en grande partie l'effet dont il s'agit, qu'on ne retrouve, en définitive, que dans des balanciers défectueux. Au surplus, d'après M. Vissière, cet effet est susceptible de se corriger en faisant plusieurs fois recuire le balancier à des températures de 200 à 300°. — D'autre part, le balancier comporte des pièces for-

mées de deux métaux dans un état d'association forcée, qui, par suite, ne se trouvent ni l'un ni l'autre à l'état d'équilibre moléculaire, eu égard aux oscillations incessantes du régulateur. La force centrifuge les déforme constamment; et, bien qu'on remédie en partie (n° 16) à ce résultat, il n'en suit pas moins de là une tendance à une déformation graduelle, que des circonstances accidentelles, telles que chocs, influences électriques ou calorifiques, sont de nature à exagérer et à précipiter.

— De son côté, la vis qui relie chaque masse compensatrice sur sa lame bi-métallique, peut *glisser* sous l'influence d'un changement de température, et amener, de même qu'un choc (n° 26), un déplacement de cette masse, déterminant, si minime qu'il soit (n° 18), une variation de la marche.

Semblablement, l'état vibratoire constant du spiral n'est pas sans influer sur ses propriétés élastiques. Il arrive qu'au bout d'un certain nombre d'années, l'action de ce ressort devient plus capricieuse. On est parfois obligé de le remplacer sans qu'il y soit survenu aucune avarie grave.

— Il y a une assertion du Dr Peters qui mérite d'attirer l'attention. Selon ce savant, lorsqu'un chronomètre, par l'effet du temps, prend un retard considérable, c'est souvent signe qu'il y a oxydation du spiral.

Ce fait se présente rarement. Il se justifie en théorie parce que la rouille diminue la force élastique du spiral, et augmente sa masse de tout le poids de l'oxygène absorbé; ces deux causes concourent à faire retarder la montre. Toutefois on ne possède pas d'observations précises à l'appui de l'assertion que nous venons de relater. Ajoutons que le cas d'oxydation d'un spiral est fort heureusement rare, et que l'observation des règles de précautions recommandées (n° 152 des « *Nouvelles méthodes de navigation* ») pour l'installation des chronomètres à bord, doit généralement affranchir de toute crainte à ce sujet.

En tout état de cause, il sera bon, lors d'un spiral oxydé, et si d'ailleurs cela peut se faire sans inconvénient, d'arrêter le chronomètre pour éviter la rupture du ressort rouillé. Car au retour en France, le fabricant du chronomètre peut réparer le mal sans refaire un spiral neuf.

— En somme, la plupart des perturbations que nous venons de relater portent sur des chronomètres *neufs*, surtout de médiocre fabrication, soumis d'ailleurs à des variations rapides de température. Dès lors, on ne devrait, en principe, mettre les montres en service

qu'après avoir laissé le temps de travailler aux métaux des diverses pièces du mécanisme, afin d'assurer à ces pièces une structure sensiblement permanente.

Les horlogers connaissent fort bien les effets en question. C'est pourquoi ils ont la précaution, avant d'envoyer une montre au concours du Dépôt de la marine, de la faire marcher longtemps à des températures variables, surtout au chaud. D'ailleurs, ils recuisent le spiral; et suivant une indication sus-mentionnée, ils soumettent souvent le balancier, une fois achevé, à des températures de 200° à 300°, afin de l'amener à un état moléculaire plus stable. — Malgré ces précautions il n'est pas possible d'éviter entièrement les perturbations afférentes aux chronomètres neufs. Ces perturbations ne sauraient être prédites. Leur effet habituel est une accélération; mais il est impossible de prévoir si cette accélération sera plus ou moins forte. Seulement, l'expérience montre que, pendant les trois premières années, l'accélération peut atteindre de 5 à 15 secondes. Les mêmes chronomètres, après renouvellement des huiles, ne présentent plus ces phénomènes particuliers, du moins pas au même degré. — Quoi qu'il en soit, un chronomètre qui a passé par ces variations, reste, après comme avant, sujet à l'influence normale de la chaleur, retardant à peu près de la même quantité à mesure qu'on s'éloigne graduellement de part et d'autre de la température de réglage (n° 20), s'il en possède une. Ceci, bien entendu, n'implique pas que ladite quantité soit proportionnelle à la variation de température, ce qui en général n'est pas (n° 113 des « *Nouvelles méthodes de navigation* »).

— Une autre cause de perturbation, fort heureusement rare, est celle qui provient de l'état magnétique de l'acier des spiraux ou des balanciers.

La marche varie alors avec l'orientation de la montre; et quand on se déplace à la surface du globe, elle subit l'action du magnétisme terrestre, variable en intensité. Lorsqu'on remarque une pareille irrégularité, il n'y a qu'un remède : c'est de changer la pièce qui en est cause, après avoir essayé de lui faire perdre son magnétisme par l'action d'une température suffisamment élevée et d'une trempe nouvelle. — M. Beuf, directeur de l'observatoire de Toulon, a vérifié plusieurs fois qu'un changement dans l'orientation des chronomètres est de nature à déterminer une légère modification de la marche. On a aussi constaté, deux ou trois fois, au Dépôt de

la marine, que des chronomètres revenus de campagne avec des marches très-irrégulières, avaient des pièces aimantées. Rien n'est plus facile que de s'en assurer; il suffit d'observer la montre dans diverses orientations.

En dehors de cette circonstance d'un magnétisme permanent acquis par des organes en acier, l'influence du magnétisme des corps environnants pour déranger la marche des chronomètres est très-contestable, comme le prouvent d'importantes expériences de MM. Delamarche et Ploix. — Si le balancier seul est magnétique, on démontre qu'il y a moyen d'annuler sensiblement la perturbation de la marche, à la condition que les oscillations soient d'environ 1 tour 1/4. Mais il est évident que la perturbation reparaîtrait avec le temps, par suite de la diminution des amplitudes de celles-ci.

N° 25. Perturbations des marches provenant de l'inclinaison de la suspension. — M. Caspari est le premier qui ait traité cette question avec tout le développement désirable. Nous ne pouvons mieux faire que d'en reproduire un résumé d'après ce savant hydrographe.

On remarquera que jusqu'ici on n'a pas fait intervenir la pesanteur, parmi les causes perturbatrices dont nous avons étudié les effets sur les chronomètres. Nous avons aussi supposé que le balancier est bien équilibré, c'est-à-dire que son centre de gravité se trouve toujours sur l'axe de rotation. Mais si *ce centre de gravité est excentrique*, il ne sera permis de négliger l'action de la pesanteur qu'à la condition que cette action soit perpendiculaire au sens du mouvement, ce qui suppose la verticalité absolue de l'axe. C'est ce qui arrive rarement en toute rigueur. A terre même on ne peut s'assujettir à poser le chronomètre rigoureusement horizontal; la suspension produit des frottements qui empêchent la montre de revenir toujours identiquement à la position normale. En mer, les mouvements du navire, malgré la suspension, dérangent constamment la verticalité des axes. Quant aux montres de poche, elles sont sujettes à prendre des positions très-variables; et elles sont tantôt suspendues verticalement, tantôt posées à plat. Il importe que ces circonstances ne fassent pas varier les marches. Il est donc nécessaire de se rendre compte des perturbations qu'une inclinaison plus ou moins grande peut produire sur une montre réglée pour marcher dans la position horizontale.

Il est facile d'abord de voir que, si un pareil instrument, dont les axes dans la position normale sont verticaux, est placé de manière

à rendre ceux-ci horizontaux, les frottements des axes doivent varier, ce qui affectera l'amplitude des oscillations. Généralement, toute inclinaison se traduira ainsi par un changement d'amplitude. Pour que la marche n'en éprouve pas d'altération, il faut donc que le spiral soit isochrone. Mais cette condition ne suffit pas : il faut encore que le balancier soit parfaitement centré.

La grandeur des effets ainsi produits dépend de l'inclinaison du chronomètre : elle est nulle quand l'axe du balancier est vertical, maximum quand il est horizontal, c'est-à-dire quand l'instrument passe du *plat* au *pendu*, suivant l'expression des horlogers. — Avec l'instrument au *pendu*, l'effet perturbateur s'atténue, si, au lieu de maintenir le balancier, supposé excentré, avec son centre de gravité situé, pour la position d'équilibre, sur le plan vertical passant par son centre d'oscillation, on fait tourner le chronomètre d'un certain angle dans un plan parallèle à celui de son cadran.

Quand un horloger veut s'assurer si le balancier d'un chronomètre est bien centré, il observe la marche de ce chronomètre en l'orientant avec son cadran maintenu dans un même plan vertical, suivant quatre directions rectangulaires, c'est-à-dire en mettant successivement en bas les points III^h, VI^h, IX^h et XII^h du cadran. On trouve alors des marches notablement différentes entre elles, pour peu que le défaut d'excentricité soit appréciable. — La moyenne des marches ainsi obtenues donne une marche indépendante du sens de l'inclinaison, et qui n'est fonction que de l'amplitude des oscillations propres à cette inclinaison. Examinant alors les marches comparées à cette moyenne, on en trouve généralement deux contiguës en avance. Supposons qu'on ait constaté ainsi une avance quand les points III^h et VI^h du cadran sont placés vers le bas. On ajoutera alors du poids au balancier, à la partie qui, à l'état de repos, se trouve dans la direction intermédiaire à ces deux divisions du cadran ; et par des tâtonnements successifs, on cherchera à obtenir un équilibre plus ou moins parfait.

M. Phillips a traité la question précédente par l'analyse. Il a montré que la règle empirique, adoptée par les horlogers, n'est applicable qu'autant que les amplitudes des oscillations complètes ne dépassent pas 1 tour 1/4. — Pour cette amplitude même, les marches du chronomètre sont égales, quelle que soit la direction du cadran dans le plan incliné. Pour une amplitude plus grande, la règle pratique doit être appliquée en sens contraire.

En ce qui concerne la navigation, nous ne tirerons de ce qui précède qu'une conclusion : c'est que les meilleurs chronomètres sont exposés à des écarts de marche considérables, dès que le jeu de leur suspension est gêné. Il est donc, en principe, nécessaire de s'assurer constamment si cette condition est bien remplie. Lorsque les cercles de suspension sont faussés, ou que les axes ont cessé de tourner librement, il faut faire réparer cette avarie le plus tôt que l'on peut, sans toucher, bien entendu, au mécanisme.

On fera, en particulier, attention que les compteurs sont réglés pour la position horizontale, et que par suite ils doivent être portés et tenus à plat.

N° 26. Perturbations des marches spéciales à l'état atmosphérique et à la navigation. — Nous avons consulté avec fruit, pour l'examen de ces perturbations, les opinions de MM. les officiers de marine Mouchez, Fleuriais, Martin, de Magnac et Rouyaux, corroborées par les appréciations de M. Caspari.

Nous nous sommes déjà occupé au n° 15 de l'influence de la *pression barométrique* sur les marches; et nous avons vu que théoriquement et expérimentalement ses effets étaient entièrement négligeables. — Vient ensuite, pour ce qui concerne encore l'action de l'atmosphère, la considération de l'électricité, du magnétisme et de l'état hygrométrique de l'air.

Comme influence de l'*électricité*, on n'a constaté en général aucun changement notable des marches pendant les nombreux orages, souvent très-violents, essuyés par une grande quantité de navires; la foudre même tombant près du navire ne produit pas d'effet appréciable. Cependant M. Duperrey a constaté cette influence à bord de la *Coquille*. M. Mouchez cite un exemple d'effet électrique sur les chronomètres, et ajoute que Krusenstern et Vincendon-Dumoulin en ont observé d'analogues. — Il faut donc conclure que l'action dont il s'agit est capricieuse et irrégulière; qu'elle ne se produit qu'exceptionnellement, et probablement dans des circonstances spéciales et accumulées.

Pour ce qui a trait à l'influence sur les chronomètres du *magnétisme* des corps environnants, nous avons déjà dit (n° 24) que, d'après une étude particulière de MM. Delamarche et Ploix, corroborée par l'expérience propre de navigateurs distingués, il est sûr que le *magnétisme* du bord a très-peu d'influence sur les chronomètres. — Il en est de même du *magnétisme atmosphérique* : l'effet des

aurores boréales ou australes se trouve nul sur les marches diurnes.

Les changements de *l'état hygrométrique* de l'air ont été aussi trouvés sans action.

— Arrivons maintenant aux effets du roulis, du tangage, des secousses et des chocs en général.

Lorqu'un chronomètre est soumis à de *grands roulis*, il y a des chances pour que les effets perturbateurs dus (n° 25) aux inclinaisons de la suspension, malgré les cercles à la Cardan, se neutralisent. Toutefois il résulte, d'expériences faites au Dépôt de la marine, que généralement les grands roulis doivent avoir pour effet de diminuer légèrement les amplitudes du balancier. Leur action doit être par conséquent de faire avancer la plupart des chronomètres. — M. de Magnac a constaté un résultat de ce genre pour un Winnerl, mais il n'a rien trouvé pour seize autres chronomètres suivis par lui. M. Mouchez ne croit pas à l'influence du roulis, pourvu que la suspension reste bien libre. L'inspection des nombreuses feuilles de marches à la mer que possède le Dépôt, conduit à une conclusion analogue. Cet effet, s'il se produit, n'influe que sur les dixièmes de seconde de la marche, et se dégage difficilement des autres éléments qui troublent celle-ci.

En résumé, les montres en général ne sont pas affectées par les mouvements du navire, même de gros temps. Ce fait doit être considéré aujourd'hui comme l'opinion unanime des plus habiles navigateurs.

De leur côté, les *coups de canon*, le *filage des chaînes d'ancre*, le *remorquage par gros temps* et les *coups de talon*, ne se font également ressentir qu'exceptionnellement sur ces instruments.

Néanmoins, un ou plusieurs chocs, surtout près de l'armoire aux chronomètres, sont certainement de nature à amener une variation *brusque* et souvent *permanente* de la marche. — M. de Magnac cite une montre, qui, à la suite de quelques violents coups de talon donnés par le navire, eut sa marche retardée de 1^s,4 environ, et cela d'une manière permanente. D'un autre côté, M. Martin a constaté sur 11 chronomètres un effet de retard général, produit par des coups de marteau dans le voisinage de l'armoire des montres; mais cette fois l'effet disparut avec la cause qui l'avait produit.

La remarque suivante de M. Villarceau peut expliquer la première de ces deux espèces de dérangements. Afin de faciliter le jeu des lames bi-métalliques, on est forcé de pratiquer dans les masses

compensatrices un évidement un peu plus large que la lame correspondante. On fixe ensuite les masses à l'aide d'une seule vis de pression. Dans ces conditions, il n'est pas impossible que, soit par l'effet de la température, comme dans les circonstances citées au n° 24, soit par des chocs accidentels, comme dans le cas présent, un petit glissement vienne à se produire et à faire sentir notablement (n° 18) son influence sur les marches. — Quant au second dérangement, il semble être de même espèce que ceux décrits ci-après, dus à des entraves apportées à la suspension.

— Les *trépidations* dues au propulseur, à bord des navires de petites dimensions, et à bord des autres bâtiments quand l'armoire aux montres est trop près du propulseur, méritent une attention spéciale.

Ces trépidations, qui ont été étudiées d'une manière particulière par M. Rouyaux (n° 163 des « *Nouvelles méthodes de navigation* »), affectent alors presque tous les chronomètres, d'une manière inégale d'ailleurs. Cette influence semble consister en une variation *successive* de la marche, positive ou négative, caractérisée par une constance journalière à peu près rigoureuse, et qui disparaît au repos, mais lentement, et en suivant en sens inverse la voie qu'elle vient de parcourir.

— A la suite des diverses causes de perturbations possibles à la mer que nous venons de signaler, il en est une qui ne saurait trop attirer l'attention des navigateurs : c'est celle qui résulte de *dérangement* ou de suppression *dans la suspension des montres.* Il paraît parfaitement établi aujourd'hui que quand on supprime la suspension d'un chronomètre, et qu'il reste d'ailleurs soumis aux mouvements du bâtiment, il se produit une variation *brusque* de la marche, qui est presque toujours un *retard.* Cette variation persiste d'une manière peu uniforme du reste, tant que les mouvements du navire sont accentués et que la suspension est paralysée. Mais la mer devenant belle, la marche tend à reprendre sa première valeur. Ce dernier phénomène se produit du reste, quand, en pleine expérience, on rend à la suspension sa liberté.

Les circonstances précédentes fournissent la meilleure explication de l'effet perturbateur, souvent (mais *non généralement*) constaté lors du transport des chronomètres à bord. Toutefois, quelques personnes tiennent à ajouter à l'explication précédente dudit effet, l'influence d'une modification complète de régime et de milieu, tant à cause de la mobilité du navire que de l'atmosphère propre du bord.

Il y a aussi l'action du changement d'orientation signalée au n° 24. — Dans tous les cas, l'effet qui nous occupe disparaît d'ordinaire après 7 ou 8 jours de séjour sur le navire. En d'autres termes, au bout de ce laps de temps, les marches reviennent peu à peu de l'écart occasionné par le changement de lieu, et reprennent sensiblement leur valeur calculée à terre. D'après cela, il est bon d'embarquer les chronomètres assez à temps pour pouvoir apprécier leur marche à bord, une fois qu'ils sont acclimatés.

— Il convient de terminer ce numéro par l'indication d'une cause possible de dérangement des marches : nous voulons parler du *synchronisme*, c'est-à-dire de la tendance à vibrer à *l'unisson* que prennent divers corps vibrants, en communication soit directe, soit par l'intermédiaire de substances environnantes. On conçoit dès lors que divers chronomètres, logés dans une même caisse, puissent plus ou moins ressentir l'effet dont il s'agit, en subissant de ce chef des variations anormales dans leurs marches.

Toutefois, le fait ne s'est pas manifesté, au moins d'une manière sensible, dans les concours du Dépôt, où les montres sont placées très-près les unes des autres sur des planches, sans aucun intermédiaire.

N° 27. Anomalies extraordinaires des marches, et arrêts des chronomètres. — Les anomalies extraordinaires ainsi que les arrêts ont été étudiés en détail par M. Caspari. Voici, en substance, ce qu'il en dit :

M. Mouchez décrit certains *sauts* qu'il a observés sur des chronomètres Winnerl, dans la campagne de la *Capricieuse;* ces sauts atteignaient jusqu'à 120 secondes par jour. On ne saurait dire si les anomalies de cette espèce se font instantanément, ou si elles emploient un certain temps (un jour ou deux) à s'accomplir. Il est probable que l'une ou l'autre de ces circonstances peut se présenter.

Les sauts dont il s'agit constituent une véritable rareté, fort heureusement; et peu d'officiers, depuis M. Mouchez, ont eu l'occasion de constater des variations aussi étendues et aussi brusques. Ce qu'il y a de singulier, c'est qu'après ces perturbations considérables le chronomètre revient à sa marche normale. — Il semble rationnel d'attribuer de pareils effets soit à la mauvaise qualité des pierres formant les contre-pivots, soit à un défaut de l'échappement consistant en dérangements momentanés, surtout quand le chrono-

mètre saute successivement, soit en retard, soit en avance. On observe ce dernier phénomène sur des chronomètres vieux d'huiles, avec certains échappements. On voit alors l'aiguille parcourir la seconde entière à la fois ; ou bien encore dans d'autres cas, on s'aperçoit qu'une oscillation ne produit pas le dégagement du doigt d'échappement. M. Caspari a eu l'occasion de constater des sauts de plusieurs secondes dans les concours du Dépôt de la marine ; mais les montres sujettes à ces inconvénients sont toujours éliminées.

— Nous signalerons aussi, d'après M. Mouchez, comme une anomalie extraordinaire, le changement temporaire simultané et dans le même sens, de toutes les marches à la fois des divers chronomètres embarqués, sans qu'on puisse attribuer à la température ni au synchronisme (n° 26) ce singulier dérangement. — Enfin, l'éminent académicien cite encore l'anomalie suivante :

Il arrive souvent, et toujours sans cause connue, qu'un chronomètre, ordinairement bon, se met à varier de 10 à 20 secondes par jour dans un sens ou dans un autre, et se trouve ainsi momentanément hors de service. Cette perturbation dure plusieurs jours, souvent deux ou trois semaines ; le chronomètre reprend ensuite sa marche ordinaire. Ce qui paraît établi, c'est que des accidents de ce genre ne surviennent guère qu'à des chronomètres ayant plus de trois ans d'huiles. On est rarement à même de les observer sur des instruments marchant dans des conditions normales. — Enfin, il se rencontre des chronomètres qui, au bout d'un service plus ou moins long, se mettent à varier irrégulièrement. Mais, pour employer la comparaison de M. Mouchez, c'est là une maladie qui n'a d'autre remède que le passage chez l'horloger.

— Dans la plupart des cas que nous venons de relater, les effets observés dénotent une altération profonde du mécanisme, à moins que le régulateur n'ait acquis du magnétisme permanent. Ainsi, il arrive souvent que l'huile abandonne les pivots des pièces importantes; alors les frottements variables de l'acier sur la pierre déforment les *pivots* (n° 7), et usent les pierres des *trous*. Ces circonstances ont généralement pour résultat de diminuer les amplitudes. L'effet définitif est alors de faire s'exercer le défaut d'isochronisme, surtout s'il existe déjà un peu. C'est donc à des avaries de ce genre-là qu'on devra généralement rapporter les accélérations *brusques*, qui ne peuvent s'expliquer par une action analogue à celle que la chaleur produit (n° 24) sur les chronomètres neufs.

D'autres fois encore, on se trouve en face d'un échappement trop juste ou trop lâche. Quand la température vient à varier, l'échappement ne fonctionne plus que d'une manière intermittente ; et les mouvements imprimés de l'extérieur au chronomètre doivent parfois en suspendre ou en exagérer le jeu. Dès lors, selon le cas, il se manifeste des retards ou des avances brusques, jusqu'à ce que, soit par un choc, soit par le retour d'une température plus normale, les pièces aient repris leurs positions respectives. — Il peut arriver aussi que le ressort *auxiliaire* du remontage (n° 3) soit avarié, et que la transmission du mouvement du moteur pendant cette opération devienne ainsi plus capricieuse. Cette dernière circonstance est susceptible d'être reconnue, pourvu qu'on exécute les recommandations (n° 152 des « *Nouvelles méthodes de navigation* ») destinées à apprécier si le remontage n'apporte aucun trouble au fonctionnement du chronomètre.

On ne prétend pas expliquer, par ce qui précède, toutes les variations anormales des marches ; mais M. Caspari affirme, d'après le mûr examen qu'il a fait de l'historique de nos chronomètres, que, le plus souvent, les dérangements se ramènent à une cause du genre de celles qui viennent d'être citées.

— L'accident le plus grave qui puisse arriver à une montre, c'est l'*arrêt*. L'arrêt n'est pas toujours le résultat d'une avarie : il est souvent fortuit. Il y a d'abord celui qui résulte de la négligence de la personne chargée du remontage. En pareil cas, le chronomètre remis en mouvement reprend sa marche habituelle. Mais, même en dehors de ce cas, il peut se produire un arrêt en vertu d'autres circonstances, qui n'influent pas non plus sur la marche primitive de l'instrument. — Les chronomètres s'arrêtent assez souvent pendant le remontage même ; cela peut provenir d'une disposition vicieuse du ressort auxiliaire ou des cliquets (n° 3). D'autres fois, c'est dans l'échappement qu'en réside la cause. Il peut aussi arriver qu'un corps étranger, une parcelle de métal détachée du rouage, s'introduise dans un organe essentiel.

En principe, un chronomètre qui s'est arrêté sans cause apparente, doit inspirer une légitime méfiance. Mais il ne faudra pas pour cela en rejeter les indications, une fois que l'on aura réussi à le remettre en marche. L'expérience a prouvé que des montres sujettes à des arrêts, avaient, néanmoins, dans les intervalles, des marches régulières, et que leurs indications pouvaient être utilisées. Si, par

exemple, le corps étranger a été chassé par la secousse circulaire donnée au chronomètre quand on l'a remis en marche, la montre doit revenir à son régime normal. — Lorsque la cause d'arrêt est dans l'appareil de remontage, il suffit souvent de redoubler de précautions pendant cette opération.

Bref, quand un chronomètre se sera arrêté, et qu'on n'aura pas lieu de soupçonner une avarie grave, on essayera de le remettre en marche après l'avoir remonté, en lui imprimant un mouvement circulaire un peu vif. Si l'on réussit, on pourra continuer à le comparer aux autres montres, et supposer que sa marche n'a pas varié.

L'arrêt résulte souvent d'une usure exagérée des pièces; alors il est toujours précédé de perturbations de marche qui l'annoncent. Plus souvent encore, il est dû à la rupture d'une pièce. Enfin, on sait que les meilleurs ressorts moteurs peuvent se briser sans cause apparente.

N° 28. Variation totale des marches. Marche normale; signes adoptés pour caractériser son sens. Définition des mots *interpolation* et *extrapolation*. — Comme nous en avons déjà prévenu au n° 22, la *variation totale* d'une marche est le résultat de sa variation normale, et de toutes les perturbations simultanées qu'elle peut subir. On conçoit dès lors qu'il n'y a guère moyen d'établir d'une manière absolue dans quel sens la marche a varié, selon le temps depuis lequel le chronomètre est en service et selon la température considérée.

Cependant, en ce qui concerne le temps, il est de règle que c'est la variation *normale* due à l'âge des huiles qui est prépondérante; de sorte qu'en général (n° 23) les chronomètres prennent de l'*accélération* avec le temps. Cette accélération ne pourrait guère être masquée, au moins d'une manière permanente, que par un retard dû à l'oxydation du spiral (n° 24).

Pour la température, en revanche, on ne peut en principe prévoir dans quel sens (*accélération* ou *retard*) les variations *normales* de la marche se font sentir. Cela tient à deux causes. D'abord la température d'où on compte les variations peut être au-dessous ou au-dessus de la *température* de *réglage* (n° 20). Dès lors dans la première hypothèse on a de l'accélération au chaud, jusqu'à ce qu'on ait atteint cette température; puis survient du retard. Dans la seconde supposition, il se manifeste toujours du retard au chaud. En second lieu, si le chronomètre est imparfaitement compensé, la loi de symétrie de la marche autour de la température de réglage

n'a plus lieu (n° 23) ; et au contraire avec les chronomètres parfaitement compensés, cette température elle-même n'existe pas. — Enfin l'action *normale* de la température est souvent *masquée* plus ou moins complétement par son action irrégulière (n° 24) ; cette action irrégulière se traduit dans un grand nombre de cas, surtout avec les chronomètres sortant de l'atelier, par une *accélération brusque* et *permanente*, sous l'influence de la chaleur. Tel est l'effet déjà cité audit n° 24, qu'on remarque sur les montres neuves qui passent pour la première fois, et rapidement d'ailleurs, des climats tempérés aux pays tropicaux.

— Heureusement que, pour les besoins de la navigation, on n'a pas besoin d'être édifié sur l'essence des phénomènes produits. Le point capital est de pouvoir les apprécier.

On voit au n° 108 des « *Nouvelles méthodes de navigation* », qu'il y a moyen de mesurer avec une rigueur suffisante l'influence *normale* des variations de la température et de l'âge des huiles. Dès lors, abstraction faite des *perturbations*, on peut chaque jour calculer par *interpolation* ou *extrapolation* (voir ci-après la signification de ces mots), la marche qui convient au chronomètre eu égard à la température et à l'époque, c'est-à-dire la *marche normale.*

Ainsi donc, *la marche* NORMALE *d'un chronomètre à une date donnée est égale à la marche qui convient pour un jour convenu, corrigée de ses variations normales* (n° 23) *dues à la différence de température moyenne entre ladite date et le jour en question, et à l'écart de cette date par rapport à ce même jour.*

On conçoit qu'une fois calculée la valeur *normale* de la marche, la comparaison de cette valeur avec celle obtenue par une observation directe, ou à l'aide d'autres chronomètres, indique s'il y a une perturbation. Car il paraît prouvé que celle-ci, quelle que soit son origine, n'affecte pas en principe l'influence *normale* de la température et de l'âge des huiles.

Enfin, pour les besoins de la navigation, il reste à être avisé que toute *perturbation* peut être spécifiée par un des caractères numériques énoncés au n° 157 des « *Nouvelles méthodes de navigation* », et qui résultent de l'étude de leurs effets développés dans le cours du présent paragraphe.

— Il importe de prévenir que dans ce qui suit, nous considérerons les marches en AVANCE comme POSITIVES ; et les marches en *retard* comme *négatives.*

Plusieurs auteurs proscrivent tout *signe* pour les marches. Nous ne saurions partager cette manière de voir, surtout eu égard à la grande utilité des signes pour les graphiques de marche (nos 142, 144, 149 et 150 des « *Nouvelles méthodes de navigation* »).

— On a souvent l'occasion, en chronométrie appliquée, de se servir des mots précités d'*interpolation* et d'*extrapolation*.

D'une manière générale, ils indiquent l'opération qui consiste à trouver un élément (une marche par exemple) en fonction d'autres éléments (la température et le temps), connaissant une série plus ou moins étendue de valeurs du premier élément correspondant à des valeurs des seconds éléments. Suivant que la valeur de l'élément cherché tombe ENTRE ses valeurs données, ou *en dehors*, il y a INTERPOLATION ou *extrapolation*. Les deux circonstances dont il s'agit peuvent du reste se présenter *analytiquement* ou *géométriquement*. Chacun de ces cas a lieu suivant qu'à l'aide des valeurs connues de tous les éléments, on établit (n° 132 de l'ouvrage précité) une *formule* ou une *courbe* représentant la loi de variation du premier élément en fonction des seconds. — Dans le cas où on opère géométriquement, l'*extrapolation* consiste à prolonger, suivant des moyens propres à chaque cas, la branche de courbe obtenue à l'aide des valeurs précitées. Ceci exige que la branche en question représente le mieux possible la forme rigoureuse de la courbe, et par suite qu'on la trace en se basant sur la théorie des erreurs d'observation On trouvera de nombreux exemples d'*extrapolation géométrique*, dans les diverses sortes de *graphiques de marche* des chronomètres (nos 142, 144, 149 et 150 même ouvrage); et on verra comment l'application de ladite théorie permet de remplir la condition susmentionnée.

N° 29. Conditions d'admission et de réparation des chronomètres dans la marine militaire en France et en Angleterre. — L'énoncé de ces conditions fait l'objet d'un règlement ministériel. Il nous a semblé le complément naturel de l'important paragraphe que nous venons de développer.

1°. Les chronomètres de fabrication française sont achetés au concours après une épreuve de *trois mois* au Dépôt de la marine. Pendant cette épreuve ils sont soumis à la température ambiante, et à des températures voisines de 5° d'une part et de 30° de l'autre.

2°. Le plus grand écart des marches à la température ambiante, ajouté au plus grand écart des marches aux températures artifi-

cielles indiquées ci-dessus, donne, pour chaque chronomètre, un nombre N qui sert à le classer.

3°. Les chronomètres pour lesquels ce nombre N ne dépasse pas trois secondes, sont déclarés admissibles.

4°. Les chronomètres sont achetés au prix uniforme de *deux mille francs* l'un.

5°. Parmi les chronomètres reçus dans le cours d'une même année, celui qui a obtenu le premier rang reçoit une prime de *douze cents francs*, pourvu toutefois que le nombre N, qui a servi à le classer, ne dépasse pas deux secondes cinq dixièmes.

6°. La réparation des chronomètres, y compris le renouvellement des huiles, quelles que soient son importance et sa nature, est faite au prix normal de *quatre-vingts francs*. Cette réparation est réservée de droit aux artistes qui ont fabriqué l'instrument. Elle ne peut être confiée à d'autres que sur leur refus. — Tout chronomètre réparé, qui, expérimenté au Dépôt pendant un mois, suivant le mode indiqué en 1°, donne un nombre N ne dépassant pas deux secondes, reçoit une prime de *deux cents francs*.

Pour calculer le nombre N, qui, d'après la condition 1° ci-dessus, constitue la valeur de chaque chronomètre, il faut avoir recours aux marches et aux températures moyennes, recueillies avec autant de soin que possible par série de cinq jours, pour chaque expérience à chaud, à froid et à la température ambiante. Toutefois, cette détermination du nombre N offre des difficultés sérieuses; car la clause 2° n'est pas assez explicite pour indiquer exactement la voie à suivre. — Après bien des tâtonnements et un examen très-attentif des conditions dans lesquelles se trouvent les chronomètres essayés, le Dépôt a été amené à adopter la méthode suivante :

On entre-croise les séries d'expériences à la température ambiante avec des séries successivement à chaud et à froid. Soient alors :

m_a, m'_a, m''_a... les marches de diverses séries à la température *ambiante;*
m_c, m'_c, m''_c... les marches aux températures *chaudes;*
m_f, m'_f, m''_f... les marches aux températures *froides.*

On prend la plus petite et la plus grande des marches m_a, m'_a, m''_a.... Leur différence N_a donne le plus grand écart à la température *ambiante.* — On fait ensuite les différences entre chaque marche m_c, m'_c, m''_c...., m_f, m'_f, m''_f,.... aux températures artificielles, et les marches à la température ambiante qui les précèdent et les suivent